

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria dei Sistemi

Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Gestionale



**Una Metodologia Cross View di Sviluppo di Key  
Performance Indicator di Efficienza Energetica**

Relatore: Prof. Marco TAISCH

Correlatore: Gökan MAY

Tesi di Laurea di:  
Ilaria Giovanna BARLETTA, Matr. 756015

Anno Accademico 2011-2012



*La sapienza fa crescere i suoi figli  
e ha cura di quanti la cercano.  
Chi la ama, ama la vita,  
si ralleggeranno quanti l'aspettano  
prima dell'aurora.*

(Siracide 4, 11-13)

## RINGRAZIAMENTI

E alla fine ci siamo...il mio percorso di studi, tra un misto di tribolazioni e soddisfazioni, si conclude con questa tesi di laurea.

Ringrazio la mia famiglia: mio padre, mia madre e mio fratello. Non voglio dilungarmi scrivendo di tutte le volte che mi siete stati vicino, avete celebrato i miei successi e condiviso i miei dispiaceri...dico solo che, anche se a questo mondo non avessi più nulla a parte voi al mio fianco, non smetterei di ringraziare Dio per quello che mi ha dato. Vi amo!

Ringrazio i miei parenti, che mi hanno aiutato sia economicamente, sia standomi vicino...E' grazie anche a voi se ce l'ho fatta!

Ringrazio inoltre tutte le persone con le quali ho trascorso questi anni di università, in particolare Anna, Francesco, Nicoletta, e agli amici conosciuti al Ceur!

Ringrazio il Professor Taisch, e il mio tutor Gökan per tutti gli insegnamenti che ho avuto modo di apprendere grazie a lui, e inoltre tutto il gruppo dell'ufficio 0.29bis che mi ha fatto compagnia in questi mesi di duro lavoro. Thank you guys!

Pur rischiando di peccare di egocentrismo, dedico questa tesi a me stessa...ai caffè che ho trangugiato per star sveglia quando dovevo studiare, alle camomille che ho trangugiato per rilassarmi quando dovevo dormire, ai weekend trascorsi a casa in compagnia di film e pietanze surgelate, e ai numerosi nonché pittoreschi elementi che hanno caratterizzato questi anni indimenticabili di università!

Spero che questo traguardo possa aprirmi le porte ad una vita serena e ad una carriera gratificante.



# SOMMARIO

## Una Metodologia Cross View di Sviluppo di Key Performance Indicator di Efficienza Energetica

**Abstract:** *L'attuale scenario economico e ambientale in cui le aziende si trovano ad operare è caratterizzato da trend quali cambiamenti climatici, forniture incerte di energia e aumento del prezzo della stessa. In particolare, il settore del Manufacturing deve rendersi più sostenibile rispetto agli altri settori, in quanto responsabile di quasi il 33% dei consumi di energia primaria e del 38% delle emissioni di CO<sub>2</sub>. L'efficienza energetica e i consumi energetici giocano un ruolo chiave in questo scenario. Questo lavoro di ricerca si propone di sviluppare una metodologia strutturata per la misura, l'analisi e miglioramento delle performance energy-related delle aziende del discrete Manufacturing attraverso la progettazione e l'utilizzo di un sistema innovativo di Energy KPI, orientato a supportare le aziende manifatturiere nel decision making dell' energy management. La metodologia cross view genera Energy KPI sulla base delle relazioni di causa-effetto tra sistema manifatturiero e consumo energetico, e consente di sfruttare il potenziale offerto dal monitoraggio energetico per fornire agli energy manager informazioni dettagliate che indirizzino in maniera appropriata il continuous improvement delle performance energy-related.*

**Key Words:** Energy Efficiency in Manufacturing, Energy Management, Performance Measurement System, Key Performance Indicators.

### 1: Introduzione e Research Focus

L'attuale scenario economico e ambientale in cui le aziende si trovano ad operare è caratterizzato da trend quali cambiamenti climatici, forniture incerte di energia e aumento del prezzo della stessa. Le aziende, per poter mantenere e accrescere il proprio vantaggio competitivo, devono venire incontro a questi trend. In particolare, il settore del Manufacturing necessita di un focus più specifico, in quanto responsabile di quasi il 33% dei consumi di energia primaria e del 38% delle emissioni di CO<sub>2</sub> (IEA, 2008). Ne consegue come lo sviluppo sostenibile debba essere una *guideline* portante di tutte le attività del Manufacturing.

La "macroarea" di ricerca del lavoro è dunque il *sustainable manufacturing*. Tra le diverse definizioni esistenti in letteratura viene riportata quella emessa dal Lowell Center for Sustainable Production: "La produzione sostenibile è la creazione di prodotti e servizi utilizzando processi e sistemi che sono non inquinanti, che preservano l'energia e le risorse naturali, economicamente profittevoli, sicuri e

salutari per i dipendenti, la comunità e i consumatori, e socialmente e creativamente gratificanti per tutti i dipendenti”.

L’International Energy Agency (IEA) in “Assessing measures of energy efficiency performance and their application in industry” (2008b) afferma come un utilizzo più efficiente dell’energia disponibile sia una uno degli approcci migliori per venire incontro all’esigenza di rendere le organizzazioni maggiormente sostenibili. Herrmann & Thiede (2009) considerano in particolare il *consumo energetico* come l’aspetto più determinante in questo scenario, evidenziando la sua stretta relazione con la pianificazione e gestione degli impianti di produzione.

Esistono varie definizioni di Efficienza Energetica (EE) il letteratura. La più comune vede l’EE come “l’utilizzo di minor energia per la produzione della stessa quantità di servizi o output utile” (Patterson, 1996). L’EE contribuisce dunque in maniera significativa ad una migliore produzione sostenibile: essa è relazionata a tutti e tre gli aspetti della *triple bottom line* del sustainable manufacturing (Bunse et. al, 2011). Ad esempio, per quanto riguarda l’aspetto ambientale, l’IEA (2008) ha stimato la possibilità di ridurre fino al 40% le emissioni di CO<sub>2</sub> attraverso leve di EE all’interno del settore industriale entro il 2050. Ad ogni modo è necessario comprendere *in che modo* l’EE possa essere efficacemente introdotta nella produzione industriale e nel Manufacturing, al fine di formulare un focus di ricerca ben definito, rilevante e *committed* da parte degli attori internazionali attualmente coinvolti all’interno dell’Energy Efficiency in Manufacturing (EEM), sia nel mondo delle imprese che nel mondo accademico. A tal proposito la figura 1 e la figura 2 mostrano il processo eseguito per la definizione del research focus: nella prima figura il processo è illustrato in termini di step successivi, la seconda in termini di framework.

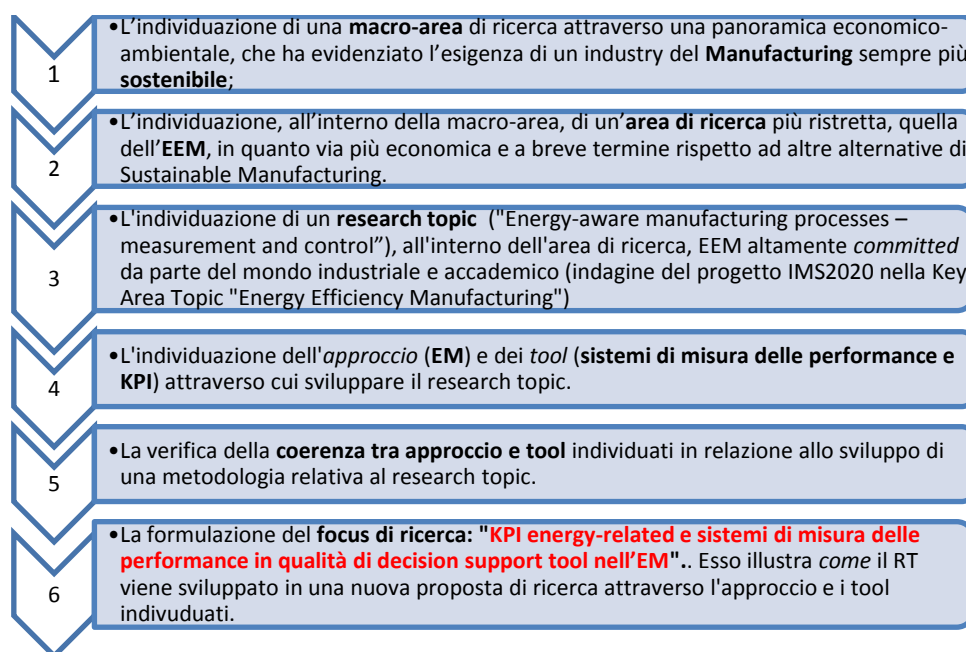


Figura 1 : Step di metodologia di ricerca adottata per l’individuazione del research focus.

Il framework (figura 2 a pagina seguente) mostra le relazioni tra i diversi *topic*, in una duplice prospettiva. La prospettiva esterna illustra i topic presenti nella ricerca accademica, giungendo al Research Topic (RT) di riferimento. La prospettiva interna tratta il modo in cui il research topic è stato sviluppato nella trattazione: in essa si vede come il RT venga sviluppato attraverso un approccio di Energy Management (EM), e un tool costituito da Key Performance Indicator (KPI) e Performance Measurement System (PMS) di EE.

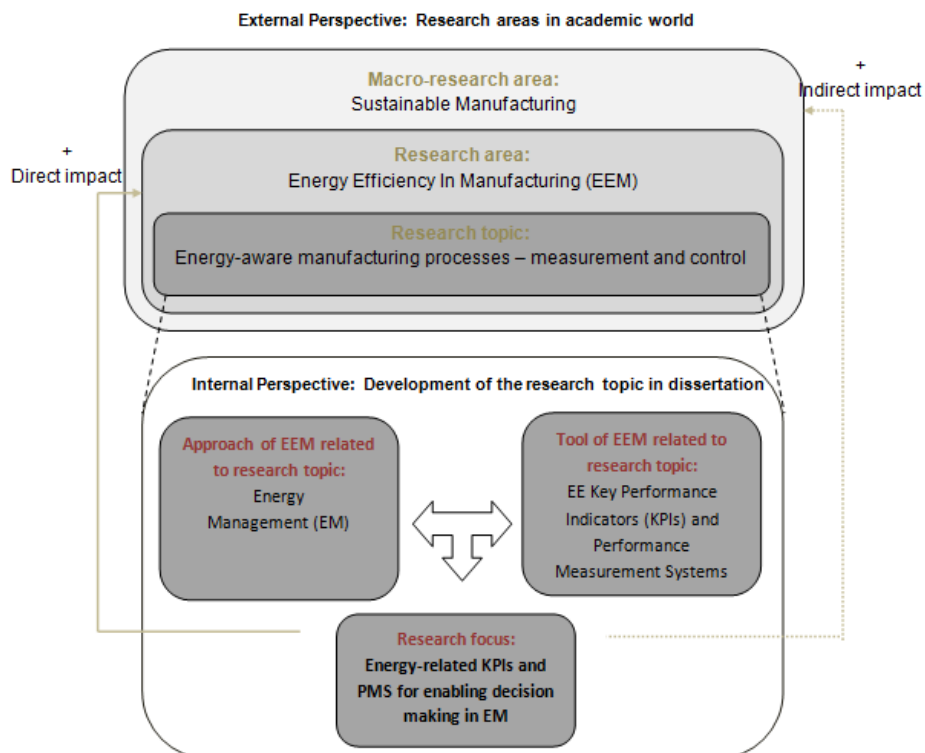


Figura 2 :Framework di individuazione del research focus.

L'utilizzo di un approccio di EM, a differenza di altri approcci di miglioramento dell'EE -quali approcci tecnologici (esempio: tecnologie di produzione più efficienti) e approcci organizzativi (certificazioni energetiche ed ambientali, partecipazioni ad *energy program*)- è coerente con lo sviluppo del RT, dal momento che l'EM è definito come "l'applicazione di risorse dirette alla fornitura, conversione, e utilizzo dell'energia che essenzialmente coinvolgono il monitoraggio, la misura, la registrazione, l'analisi, l'esame critico, il controllo, il reindirizzamento e il miglioramento dei flussi di energia e di materiali attraverso sistemi che consentano di spendere la minor quantità di energia per il raggiungimento degli obiettivi interessati" (O'Callaghan, 1977, adattata da Bunse, 2011).

Anche l'utilizzo di uno strumento quali i KPI e PMS di EE sono coerenti con lo sviluppo del RT, dal momento che la misurazione delle performance è una componente critica del modello *performance-based management*, costituito dal ciclo Plan-Do-Check-Act (*Continuous Improvement*) (Artley, Ellison e Kennedy,



2001). Inoltre i KPI, se progettati in maniera SMART (Doran, 1981) costituiscono un tool chiaro, sintetico, utilizzabile da diversi livelli del management, per poter abilitare e/o migliorare il decision-making.

Si conclude dunque che il focus di ricerca tratta i sistemi di misura delle performance energy-related in qualità di *decision support tool* nell'EM.

## 2: Confini e obiettivi del lavoro

La figura 3 si propone di illustrare in maniera sintetica e qualitativa i confini e l'obiettivo del lavoro.

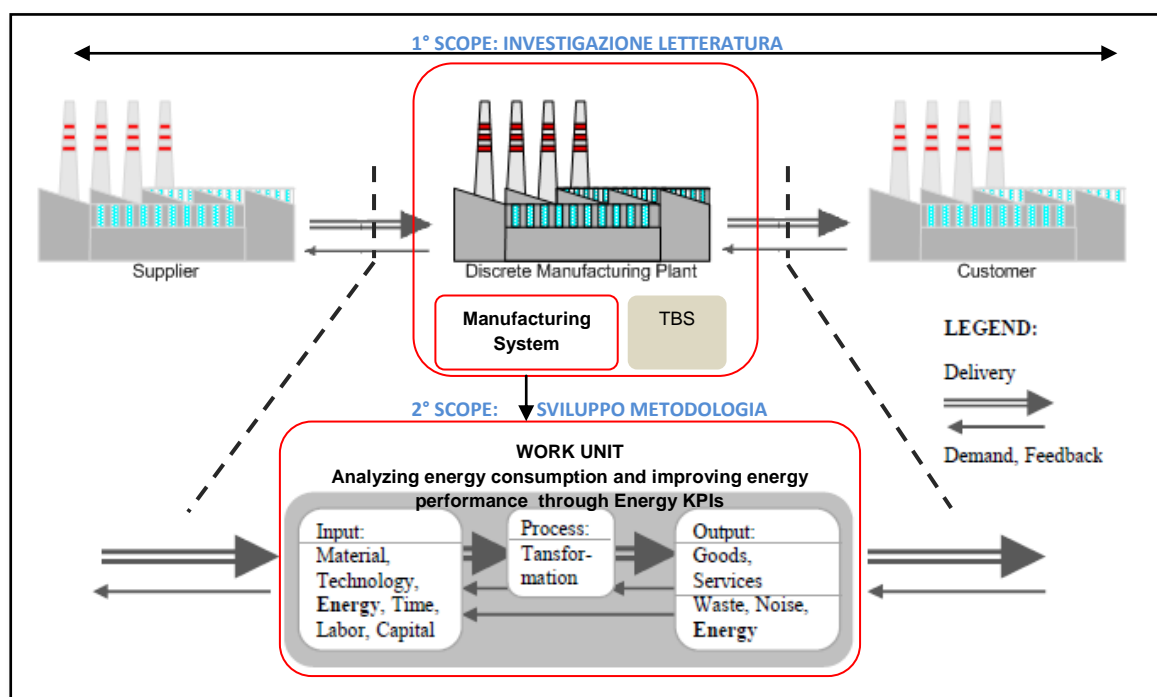


Figura 3 : Rappresentazione semplificata dei confini e obiettivi del lavoro.

Si procede dunque alla descrizione dell'industry di riferimento (nome associato all'impianto al centro della figura) e del processo adottato per la definizione dello *scope* di ricerca (i confini sono rappresentati in figura dai box rossi). Per quanto riguarda l'obiettivo del lavoro, esso è formulato, a questo punto della trattazione, in maniera generica, e sarà successivamente rifinito nel capitolo 3 di *Research framework e Research Methodology*, grazie alle informazioni apportate dalla gap analysis.

Lo stabilimento al centro in figura è uno stabilimento di *Discrete Manufacturing*. Mentre nelle industry *energy-intensive* (acciaio, cemento, carta, chimico, ecc.) fare EE è stato sempre considerato un *must have* (vista l'elevata incidenza – anche fino al 60%- dei costi dell'energia sui costi operativi), gli studi attualmente svolti per le industry non-energy intensive sono piuttosto scarsi, nonostante i

costi dell'energia impattino con una parte non trascurabile sui costi totali industriali (Rohdin et al., 2006).

Per questo motivo l'industria a cui la trattazione si rivolge è l'industria *non-energy intensive*, rappresentata da quella della produzione discreta (meccanico, elettrico, aerospace, automotive, ecc.). Inoltre, all'interno della produzione discreta, verranno studiati dal punto di vista energetico i soli elementi del Manufacturing System (MS), rappresentati in questa trattazione attraverso i livelli incrementali dell'*Equipment Model* dell'ISA-95: i Technical Building Services (TBS) sono *out of scope*.

Nella trattazione vengono distinti due tipologie di *scope* di ricerca: il primo riguardante l'investigazione all'interno della letteratura, e –al suo interno - il secondo *scope* riguardante invece i confini in cui la metodologia andrà sviluppata. All'interno del primo *scope* verranno eseguite esplorazioni dello stato dell'arte dei KPI di EE dal livello settoriale e nazionale a livello macchina e processo. Le informazioni apportate dalla gap analysis e il supporto fornito da un Performance Measurement System di EE appositamente sviluppato consentono di ottenere il secondo *scope* metodologico, più ristretto e ben circoscritto, che è quello della singola Work Unit all'interno del Manufacturing System di un impianto della produzione discreta.

In conclusione, ci si propone di sviluppare una metodologia strutturata per la misura, l'analisi e miglioramento delle performance energy-related delle aziende del *discrete Manufacturing* attraverso la progettazione e l'utilizzo di un sistema innovativo di Energy KPI, secondo un approccio orientato a supportare le aziende manifatturiere nel decision making dell'energy management.

### 3: Revisione Bibliografica e Gap Analysis

La figura 4 mostra l'approccio complessivo con il quale è stata condotta la revisione bibliografica.

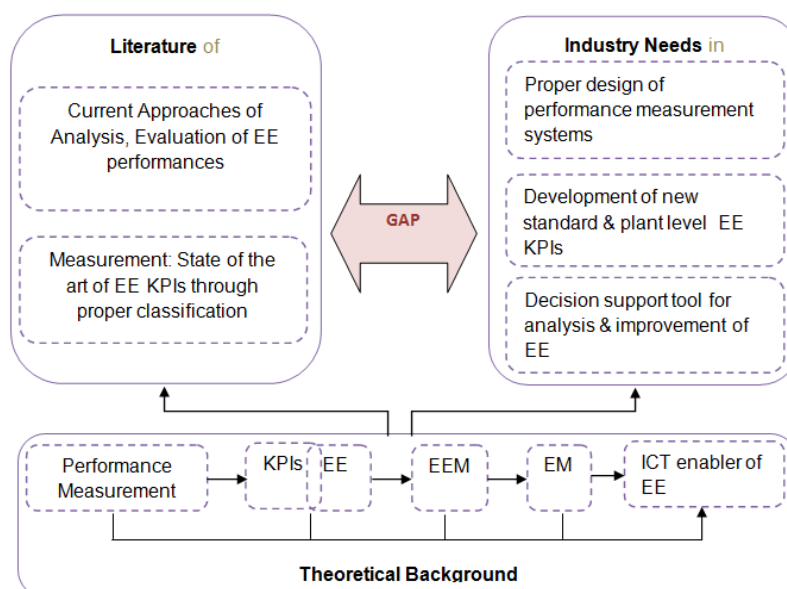


Figura 4 : Revisione Bibliografica e Gap Analysis

Il background teorico, posto alla base della figura, getta le fondamenta necessarie per poter comprendere le due sezioni successive, orientate alla focus di ricerca della trattazione (si vedano le frecce che collegano il background teorico con i box sovrastanti). In esso sono state esplorate una serie di definizioni emesse in letteratura riguardanti i topic di *Misura delle Performance*, *Key Performance Indicator*, *Efficienza Energetica*, *Efficienza Energetica nel Manufacturing*, *Energy Management e il supporto dell'ICT all'EE*, e sono state selezionate le definizioni di riferimento che verranno utilizzate nella trattazione. La figura mostra le relazioni esistenti tra i diversi topic all'interno del background teorico.

Il "GAP" in figura costituisce l'output conclusivo della revisione bibliografica: sulla base delle informazioni ricavate dalla letteratura e dalle esigenze emergenti, esso mette in luce in maniera formale i problemi esistenti attraverso gap di ricerca, *parte* dei quali la trattazione si propone di colmare.

Nell'analisi della letteratura (box a sinistra della figura 4) è stata eseguita un'accurata *overview* dei KPI di EE. Il loro stato dell'arte è stato classificato attraverso opportune dimensioni di classificazione. La tabella 1 mostra le dimensioni utilizzate per la classificazione dei KPI di EE, e le relazioni che sussistono tra gli attributi delle tre dimensioni: gli attributi della stessa riga sono nella stragrande maggioranza dei casi relazionati tra di loro. Tuttavia, in alcuni casi, la relazione esistente potrebbe essere più sfumata (indicata in tabella attraverso le frecce tra riga e riga).

**Tabella 1 : Dimensioni utilizzate per la classificazione dello stato dell'arte dei KPI di EE.**

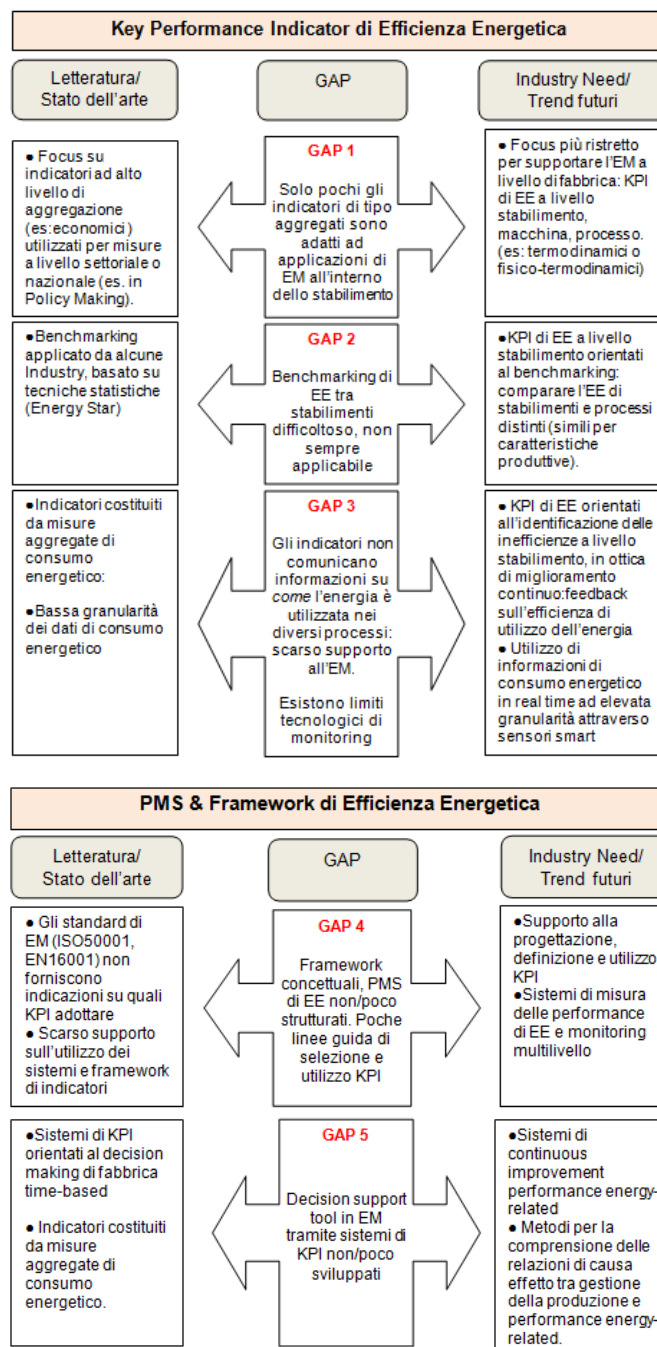
<b>Livello di aggregazione dei dati</b> (IEA, 2007)	<b>Livello Decisionale</b>	<b>Scale</b> (Equipment Model ISA-95)
Dati aggregati	Strategico	Enterprise
Dati disaggregati	Tattico	Site
Process/Appliance	Operativo	Work Center
		Work Unit

Come si intuisce dalla tabella 1, lo *scope* della revisione dei KPI di EE è uno *scope* più ampio possibile. Sono state inoltre esplorate tutte le categorie di KPI di EE esistenti in letteratura, le quali si differenziano tra loro sulla base delle grandezze presenti nella formula di calcolo dell'indicatore. Le categorie esistenti di KPI di EE sono di tipo termodinamico, fisico-termodinamico, economico-termodinamico, economico-fisico, economico, eco-efficiency e "altro". La letteratura fornisce revisioni dei KPI di EE poco esaustive, la maggior parte delle quali si limita ad elencare indicatori "tipo" come lo *Specific Energy Consumption* (SEC). La review eseguita nella trattazione ha non solo classificato gli indicatori

“tipo”, ma anche ha associato ad ognuno di essi i relativi e “specifici” KPI revisionati, (in riferimento all’esempio fatto prima, un KPI specifico è lo *Specific Cutting Energy*) esplorando fonti bibliografiche quali i paper accademici, gli standard e i report di istituti e organizzazioni, documenti disponibili in rete di progetti e iniziative.

E’ stata condotta un’esplorazione degli approcci attuali al monitoraggio, misura, analisi e valutazione delle performance di EE da parte delle aziende, in particolare manifatturiere (box a destra della figura 4).

Il risultato è una *gap analysis* così composta. Essa è stata eseguita sia in relazione ai singoli KPI di EE che ai PMS, sistemi nei quali sono inclusi e gestiti.



#### 4: Research Question & Research Objective

In relazione a quanto emerso nella gap analysis, viene formulata una Research Question, generica e ad ampio spettro. Essa è stata scomposta in due differenti “sub-Research Question”, chiamate RQ1 e RQ2. Per ognuna di queste RQ sono stati associati i relativi Research Objective (RO), ovvero gli obiettivi che la trattazione si propone di raggiungere per poter rispondere alle RQ formulate. In particolare, la RO3 è l’obiettivo principale “in risposta” alla RQ2, a sua volta suddiviso nei sotto-obiettivi RO4, RO5. E’ importante sottolineare il fatto che lo sviluppo della RQ2 non è in “parallelo” a quello della RQ1, bensì discende direttamente dalla RQ1 e dal modo in cui le relative RO sono sviluppate all’interno della trattazione, come si evince dai box.

##### RQ

*Come migliorare l’efficienza energetica nel Manufacturing comprendendo le implicazioni delle performance time-based manifatturiere all’interno delle performance energy-related attraverso un’integrazione delle due prospettive?*

**RQ1:** *“Attraverso quale approccio le performance di efficienza energetica possono essere efficacemente selezionate, comprese, misurate e ulteriormente sviluppate dalle aziende manifatturiere?”*

**RO1:** Proporre un framework multidimensionale e scalabile di Performance Measurement System di efficienza energetica, progettato per essere standardizzabile e flessibile in termini di applicabilità all’interno dell’industry del discrete Manufacturing.

**RO2:** Utilizzare il PMS proposto per circoscrivere l’area maggiormente critica in termini di esigenza di un *tool* a supporto del decision making nell’Energy Management, a cui la RQ2 verrà riferita.



**RQ2:** *“In che modo supportare il decision making nell’energy management delle aziende manifatturiere attraverso misure di performance di consumo energetico orientate al continuous improvement?”*

**RO3:** Sviluppare una nuova metodologia che abiliti l’analisi e miglioramento delle performance di consumo energetico in qualità *decision support tool* per gli energy manager basata sulla progettazione e l’utilizzo di appropriati Key Performance Indicator.

**RO4:** Progettare Energy KPI che evidenzino in maniera puntuale il grado di efficienza della conduzione delle operations e da management dello stabilimento nei confronti del consumo energetico della risorsa in esame;

**RO5:** Introdurre delle guideline per un utilizzo efficace degli Energy KPI in azienda, con l’obiettivo di consentirne una gestione appropriata da parte del management e abilitare il miglioramento delle performance di consumo energetico tramite le informazioni da essi apportate.

#### 5: Research Framework

La figura 5 illustra il *research framework*, che rappresenta in maniera olistica la metodologica adottata per lo sviluppo delle Research Objective (RO), al fine di rispondere efficacemente alle Research Question (RQ) formulate. In alto è stato rappresentato qualitativamente il significato della RQ generica, attraverso

l'integrazione tra prospettiva time-based (del sistema manifatturiero) e prospettiva energy-based di sviluppo delle misure di performance. Ciascuna RO è riportata in figura nella maniera in cui essa si colloca all'interno del framework. Sono numerati gli elementi core elaborati: la misura delle performance di EE tramite un *Performance Measurement System Matrix* (punto "1"), l'analisi del consumo energetico attraverso una metodologia *cross view* di sviluppo di Energy KPI (punto "2"), e la gestione del sistema di Energy KPI progettati, secondo un approccio di continuous improvement (punto "3"). In figura sono indicati i *support tool* utilizzati. All'interno della energy view è stato utilizzato il grafo/diagramma di stato, all'interno del manufacturing view il diagramma di Ishikawa, e per lo sviluppo degli Energy KPI un Energy Diagram autonomamente sviluppato.

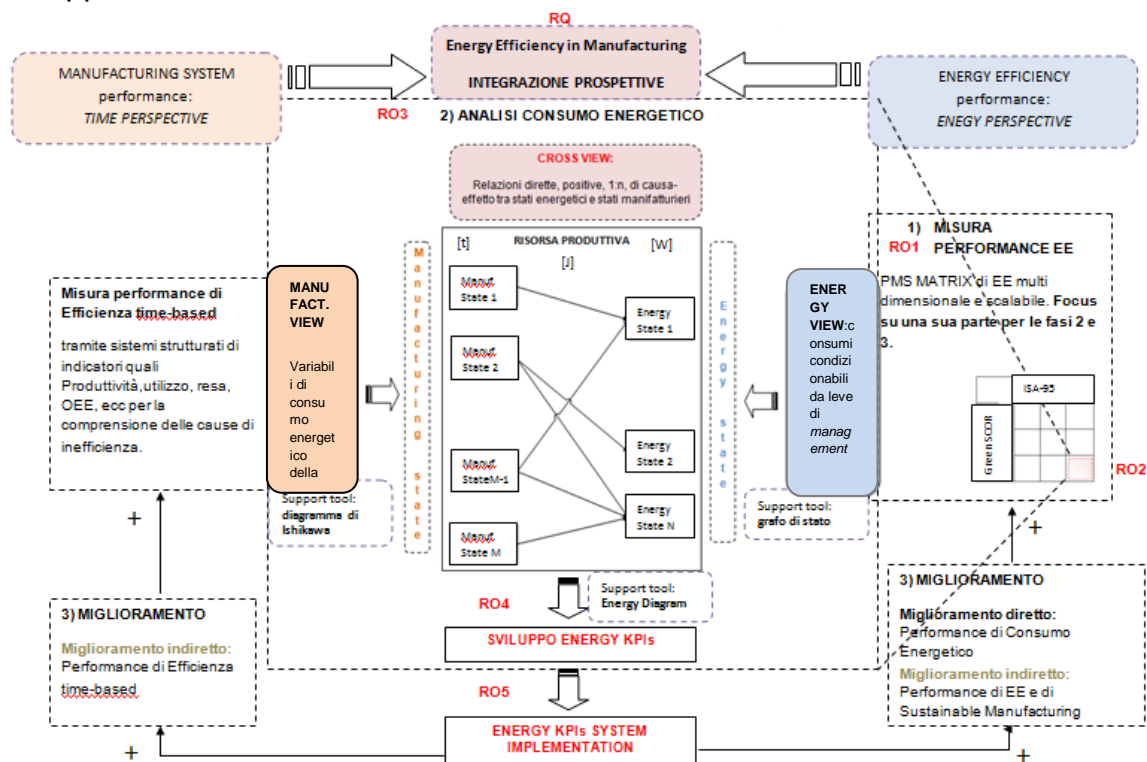


Figura 5 : Research Framework

Si illustrano brevemente i punti fondamentali di ciascuna parte core della trattazione. Per quanto riguarda il punto "1) Misura Performance di EE", al fine del supportare il processo di individuazione dell'area all'interno della quale la metodologia di formulazione degli Energy KPI avrà luogo, è stato formulato un PMS di EE strutturato secondo una struttura matriciale (RO1), costituita dai tipi di processo del Livello 1 del *Green SCOR Model* e dai livelli dell'*Equipment Model* dello standard ISA-95. Lo scope metodologico viene formulato circoscrivendo all'interno del PMS un'area specifica di sviluppo di nuovi indicatori (RO2): le informazioni apportate dalla gap analysis motivano la scelta effettuata.

La metodologia cross-view (esplicata nel framework attraverso il punto "2") associa stati manifatturieri (variabili di consumo energetico, misurati in [t]) a stati

energetici (power requirement [W]), attraverso relazioni di causa-effetto, ottenendo consumi energetici associati ad ogni stato. Il comportamento energetico della risorsa è modellizzato attraverso il diagramma a stati discreti, mentre le relazioni di causa-effetto tra stati manifatturieri e consumo energetico è rappresentata attraverso il diagramma di Ishikawa. Le relazioni di causa-effetto sono convertite in appropriati Energy Diagram che consentono di generare gli Energy KPI. Per Energy KPI si intende un indicatore costituito da dati di consumo energetico e dati di produzione, raccolti dallo shop floor in continuo o in tempo discreto, finalizzato a mettere in luce il grado di efficienza delle differenti operations e della gestione della produzione del sistema manifatturiero nei confronti del consumo di energia di una risorsa produttiva (RO4).

Infine, la gestione del sistema degli Energy KPI in un'ottica di *continuous improvement* mira a:

- dettagliare gli indicatori generati in attributi in modo tale da abilitarne un inserimento nei record sheet aziendali (Energy KPI System Design);
- individuare le variabili di consumo energetico che maggiormente hanno comportato inefficienze energetiche tramite analisi dei valori degli Energy KPI, e adottare un piano di azione che coinvolga attori e task ben definiti, orientato all'Energy Management, che agisca su tali variabili,

Il miglioramento è *diretto* (punto "3") dal punto di vista delle performance di consumo energetico (RO5), e *indiretto* dal punto di vista delle performance di sustainable manufacturing e time-based.

## 6: Research Methodology

In questa trattazione, la metodologia di ricerca è di tipo qualitativo, e in particolare si tratta del *Case Study Methodology*. L'unità di analisi è strutturata su due livelli: in letteratura si esplora l'utilizzo e le attuali applicazioni dei KPI di EE da un livello macchina ad un livello enterprise e nazionale. Dopodiché, una volta circoscritto lo scope metodologico attraverso la PMS Matrix, l'unità di analisi sarà "ridotta" al livello stabilimento. In particolare, si studierà come il consumo energetico di una macchina utensile è impattato dalla gestione delle operations della produzione. In virtù dell'adozione della metodologia del case study all'interno della trattazione, è stata realizzata un'intervista semi-strutturata, progettata in quattro sezioni distinte, ognuna con obiettivi diversi.

L'intervista ad esperti del settore della meccanica e della produzione industriale assume per questa trattazione un ruolo di validazione qualitativa. Essa, apportando informazioni "esterne" rispetto a quelle ottenibili dalla letteratura, è in grado di:

- confermare o smentire delle ipotesi fatte nel corso della trattazione;
- chiarire alcuni punti riguardanti le esigenze dell'industry di riferimento per il quale risulta necessario un confronto esterno;
- confermare la rilevanza della metodologia per l'industry selezionata, i suoi driver di applicazione, i benefici, le barriere, ecc.;
- raffinare stati energetici, stati manifatturieri, cross view, ed elementi puntuali sviluppati nel corso della metodologia.

L'intervista è dunque utilizzata per poter raffinare la trattazione ne suo complesso attraverso il contributo delle informazioni ottenute, e apportare un feedback importante per la comprensione di come la metodologia progettata possa essere implementata in una realtà aziendale. Un caso di studio supporta la validazione consentendo di triangolare i dati raccolti e aiutare ad evidenziare alcuni finding emersi.

## **7: Conclusioni e Sviluppi Futuri**

In conclusione, è stato valutato in che modo i gap di ricerca individuati sono stati soddisfatti da parte della trattazione; inoltre, sono stati illustrati i finding emersi nel corso del lavoro, e suddivisi in implicazioni teoriche e pratiche. Infine, sono stati proposti sviluppi futuri del lavoro di ricerca. Si ritiene che i gap di ricerca, rappresentati in precedenza, siano stati soddisfatti in maniera abbastanza considerevole, in particolare per quanto riguarda lo sviluppo di nuovi KPI a livello macchina, e lo sviluppo di una metodologia che sfrutti il potenziale di monitoring energetico e sappia identificare le inefficienze di stabilimento. I gap inerenti lo sviluppo di framework e framework concettuali, e inerenti nuovi metodi di benchmark di stabilimento, restano parzialmente insoddisfatti; ciononostante la tesi offre una buona base per ulteriori sviluppi futuri in merito.



# EXECUTIVE SUMMARY

## A Cross View Methodology to Develop Energy Efficiency Key Performance Indicators

**Abstract:** *Current economical and environmental scenario companies operate on is characterized by trends like climate changes, unsecured energy supplies, and rising energy prices. In comparison with other sectors, Manufacturing needs to become more sustainable, since it's responsible for almost 33% of primary energy consumptions and for 38% of CO<sub>2</sub> emissions. Energy efficiency and energy consumption play a key role in this scenario. This dissertation aim to develop a structured methodology for measurement, analysis and improvement of energy-related performances of discrete Manufacturing's firms through the design and use of a novel Energy KPIs system, with the purpose of supporting them in decision making of energy management. The cross view methodology generates Energy KPIs according to cause-effects relationships between manufacturing system and energy consumption, and allows to effectively exploit potential brought by energy monitoring and sensor technology in order to provide energy manager detailed information which will properly address continuous improvement of energy performances.*

**Key Words:** Energy Efficiency in Manufacturing, Energy Management, Performance Measurement System, Key Performance Indicators.

### 1: Introduction and Research Focus

Current economical and environmental scenario companies operate on is characterized by trends like climate changes, unsecured energy supplies, and rising energy prices. Companies have to meet these trends to maintain and gain competitive advantages. Manufacturing sector needs a more specific attention, since it's responsible for almost 33% of primary energy consumptions and for 38% of CO<sub>2</sub> emissions (IEA, 2008). It follows that the sustainable development must be a supporting guideline of all the Manufacturing activities. Therefore, the "macroarea" of this research work is *sustainable manufacturing*. Among the different definitions existing in literature, we quote that one from the Lowell Center for Sustainable Production: "creation of goods and services using

processes and systems that are non-polluting, conserving energy and natural resources, economically viable, safe and healthful for employees”.

In “Assessing measures of energy efficiency performance and their application in industry” (2008b), the International Energy Agency (IEA) affirms that a more efficient use of the available energy is one of the best approach to meet the needs to make organizations more sustainable. Herrmann & Thiede (2009) make a point about the *energy consumption* as the most critical aspect of this scenario, picking out its close relation with the planning and management of production plants. Several definitions of Energy Efficiency (EE) exist in literature. The most common comes from Patterson that states “Energy efficiency refers to using less energy to produce the same amount of services or useful output”. EE contributes to a better sustainable production in a substantial way: it is related to all of the three aspects of the sustainable manufacturing “*triple bottom line*”. To give an example concerning the environmental aspect, IEA estimated the possibility to reduce CO<sub>2</sub> emissions up to 40% through EE initiatives within the industrial area by 2050. Besides, it’s necessary to understand *how* EE can be effectively introduced in industrial production and Manufacturing, in order to formulate a well-defined, relevant and *committed* research focus by international stakeholders currently involved within EEM, both in the business and academic world.

For this reason, figure 1 and figure 2 show the process executed defining research focus: in figure 1, this process is explained in terms of consecutive steps, in figure 2 (next page) in terms of framework. The framework shows the connections between different topics, in a double perspective. External perspective describes topics present in academic research, reaching the reference Research Topic (RT). Internal perspective handles the way the research topic has been developed in the dissertation. We can see inside it as research topic has been enhanced through an Energy Management (EM) approach, and a tool constituted by EE Key Performance Indicators (KPIs) and Performance Measurement Systems (PMS).

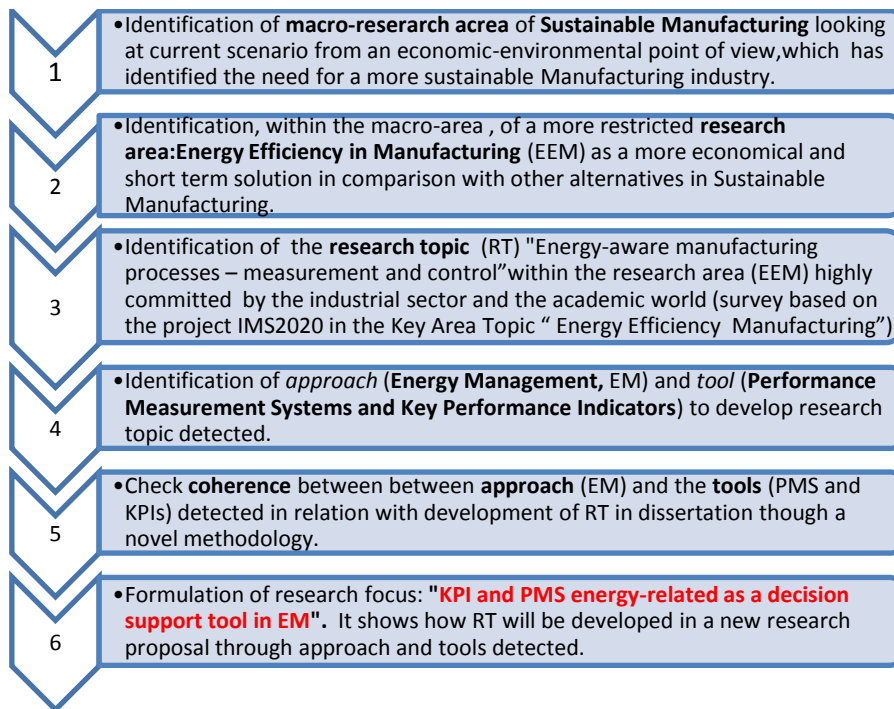


Figure 1 : Research methodology steps for defining research focus.

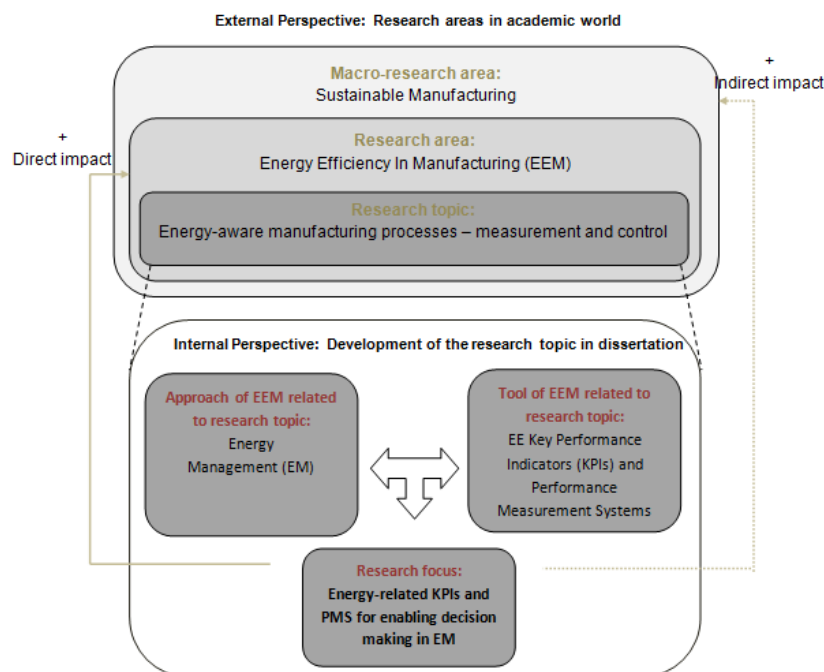


Figure 2 : Framework for identifying research focus.

Making use of EM approach, unlike other improving EE approaches – as technological approaches (i.e.: more efficient production technologies) and organizational approaches (i.e.: energy and environmental authentications, energy program attendances) – is coherent with the RT development, since the EM has been indicated as “applying to resources as well as to the supply, conversion and utilization of energy [essentially involving] monitoring, measuring,

recording, analyzing, critically examining, controlling and redirecting [and improving] energy and material flows through systems so that least power is expended to achieve worthwhile aims” ((O’Callaghan, 1977, adapted from Bunse, 2011). Use of tools like the EE KPIs and PMS is also coherent with the RT development, since performance measurement is a critical factor of the *performance-based management* model, made up of the Plan-Do-Check-Act loop (*Continuous Improvement*) (Artley, Ellison e Kennedy, 2001)). Moreover, KPIs, if designed in a SMART way (Doran, 1981), form a clear tool, usable by different levels of management, in order to enable and/or improve decision-making processes.

In conclusion, the research focus of this dissertation deals with EE PMS and KPIs as a decision support tool in EM.

## 2: Goals and Scope

Figure 3 offers to show in a concise and qualitative way the scope and the goal of thesis. Now, we continue with the description of referential industry (the name linked to plant in the middle of the figure) and of process chosen for the research scope definition (represented by red boxes in figure). Regarding thesis goal, it is formulated, at this point of dissertation, in a generic way, and will be refined later in chapter 3 of *Research framework e Research Methodology*, thanks to information brought by gap analysis.

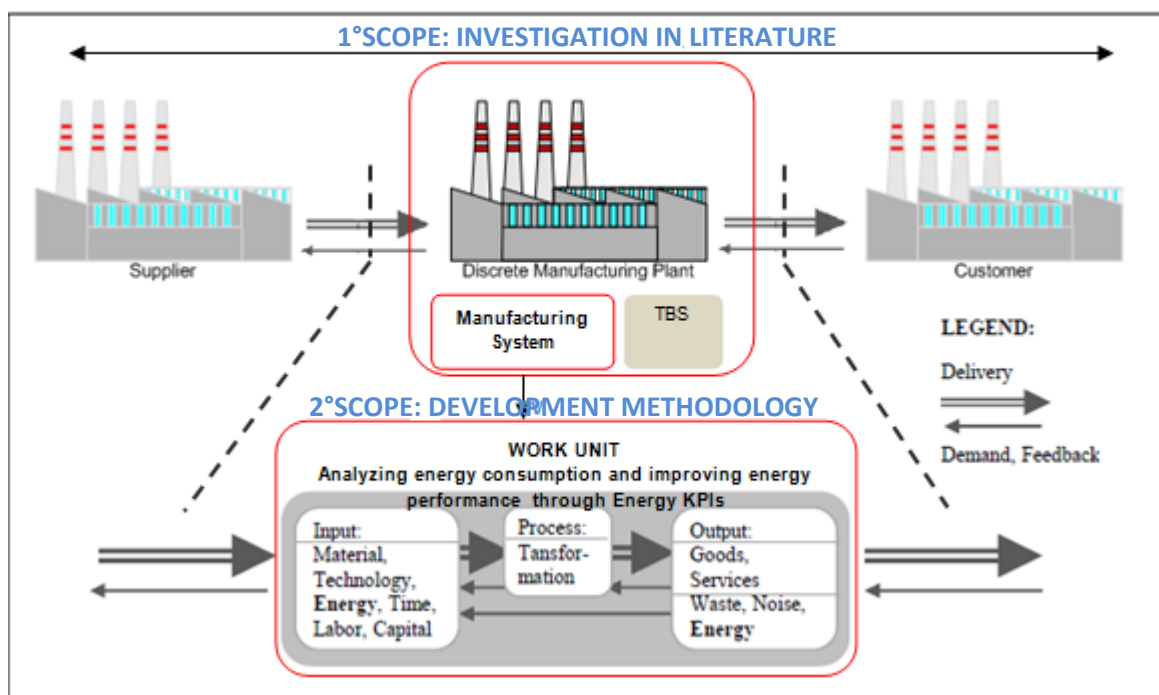


Figure 3 : Scope and general goal of thesis.

The factory in the middle of the figure is a discrete Manufacturing factory. While making EE has always been considered a *must have* for *energy intensive* industries (since the high effect – up to 60% - of power costs compared to operative costs), studies now conducted for non-energy intensive industries are

quite poor, although energy costs can weigh on a considerable part of total industrial costs (Rohdin et al., 2006). For this reason, industry which this dissertation refers to is the *non-energy intensive* industry, represented by discrete Manufacturing (mechanic, electronic, automotive, aerospace etc.). In addition, within discrete Manufacturing, will be studied, from an energetic perspective, only the Manufacturing System (MS) elements, by incremental level of standard ISA-95: Technical Building Services (TBS) are *out of scope*.

In this thesis we recognize two typologies of research scope: first one concerning the investigation within literature and – within that – a second scope which defines boundaries the methodology will be developed in. In the first scope explorations of EE KPIs state of art will be executed, from sectorial and national level, to machine and process level. Information produced by the gap analysis and the support supplied by a EE Performance Measurement System, expressly developed, allow to obtain the second methodological scope, more limited and well restricted, which is that one of a single Work Unit within the Manufacturing System.

In conclusion, we propose to develop a structured methodology of measurement, analysis and improvement of energy-related performances in *discrete Manufacturing* companies, by design and use of a novel Energy KPIs system, according to an approach oriented to support manufacturing firms in energy management’s decision making.

### 3: Literature Review and Gap Analysis

Figure 4 shows the global approach with whom literature review has been conducted.

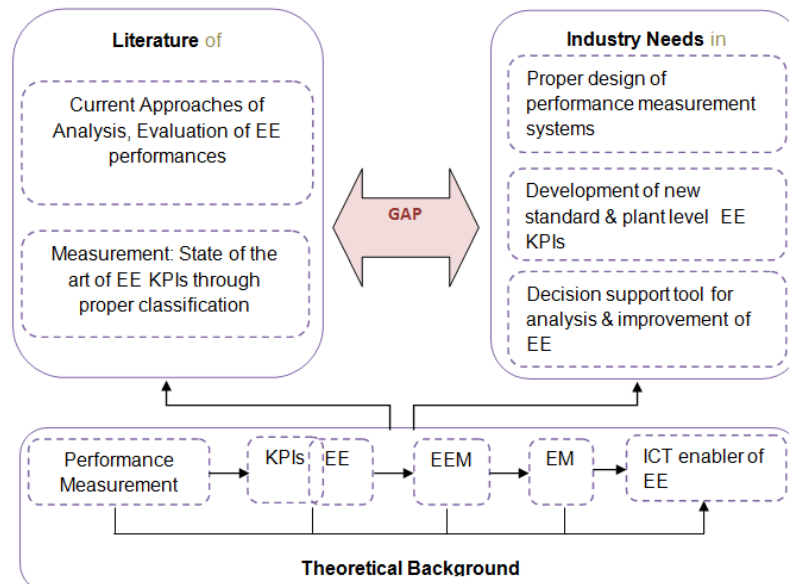


Figure 4 : Literature Review and Gap Analysis.

Theoretical background, placed at the bottom of the figure, provides the essential fundamentals to understand next two sections, oriented toward the research

focus of this dissertation. (you can see the arrows linking theoretical background with the overhanging boxes). We can explore inside it several definitions issued in literature, concerning topics of *Performance Measurement*, *Key Performance Indicators*, *Energy Efficiency*, *Energy Efficiency in Manufacturing*, *Energy Management* and *ICT as enabler of Energy Efficiency*, and we have selected those referred to dissertation. Figure 4 shows current relations between the different topics within theoretical background.

The GAP in figure 4 is the conclusive output of bibliographic review. According to information collected from literature and from rising needs, it formerly highlights the existing problems through research gaps. that this dissertation intends to fill up completely or, if not, only partially.

In analysis of literature, a careful overview of EE KPIs has been conducted. Their state of the art has been classified through proper dimensions of classification.

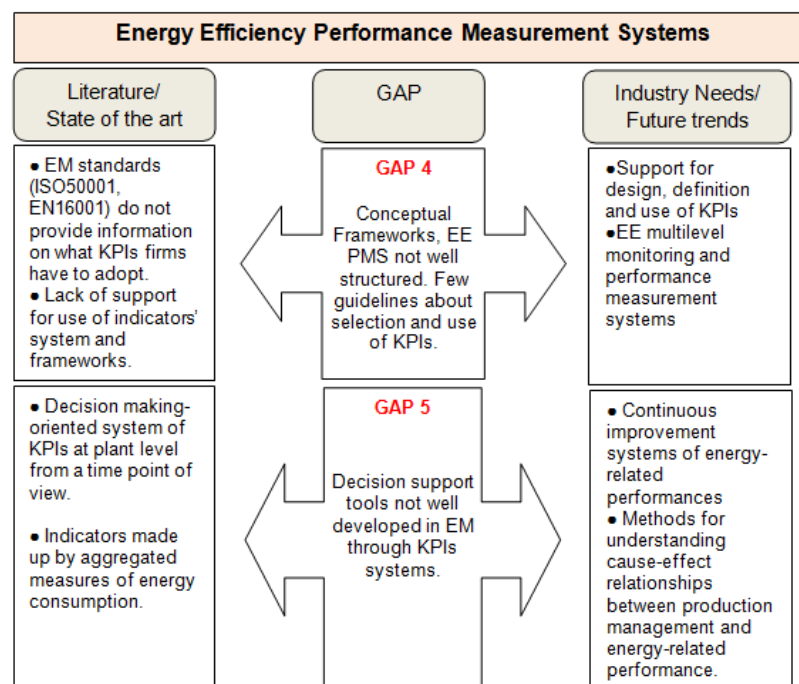
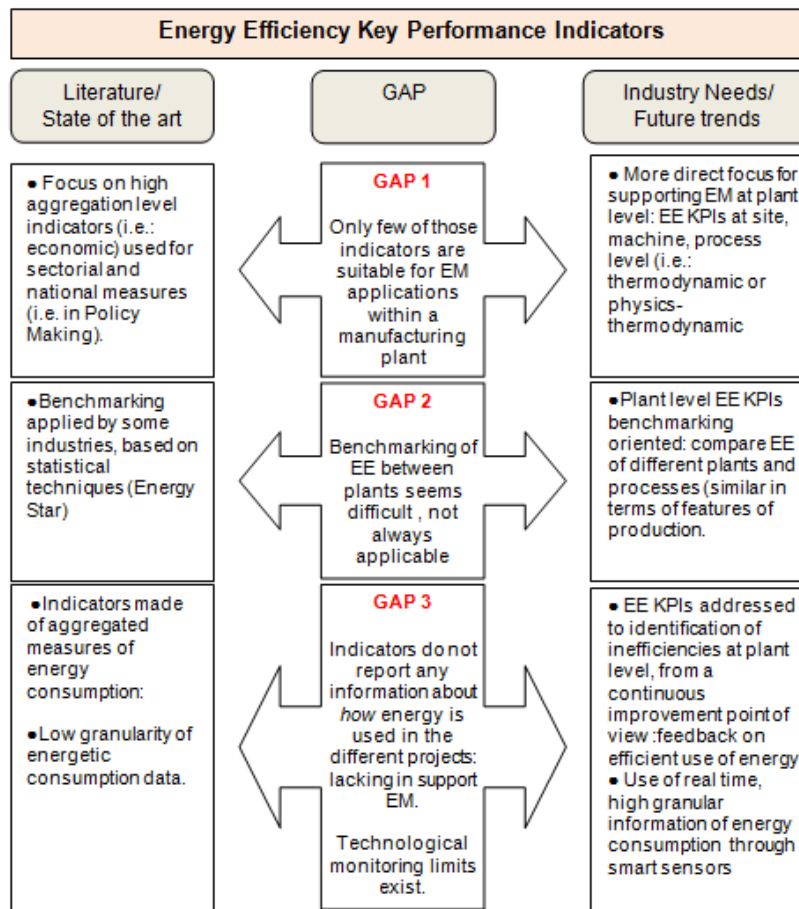
Table 1 shows the three dimensions used for classification of EE KPIs, and the relations between attributes of these dimensions: most of times, elements on the same line are linked. However, in some cases, the existing connections could be more indefinite (showed in the table through arrows between lines).

Aggregation Level	Decisional Level	Scale
Aggregated	Strategic	Enterprise
		Site
Disaggregated	Tactical	Work Center
Process/Appliance	Operational	Work Unit

Table 1 : Dimensions used for EE KPIs state of the art's classification.

As you can easily understand from table 1, scope of EE KPIs is as wider as possible. Furthermore, all *categories* of EE KPIs already existing into literature were explored: difference between categories depend on quantity present in calculation formula of indicator. Categories of existing EE KPIs are: thermodynamic, physical-thermodynamic, economic-thermodynamic, economic-physical, and eco-efficiency. Literature does not provide very comprehensive review of EE KPIs: as a matter of fact, the majority of them just make lists of general type of indicators, such as Specific Energy and Consumption (SEC). Carried out review not only classified general type of indicators, but it also matched each one with relating and "specific" KPIs reviewed (with reference to the previous example, one specific KPI is the Specific Cutting Energy) exploring bibliographic sources such as academic papers, standards and reports made by institutes and organizations, document available on internet related to projects and initiatives. An exploration of current approaches to monitoring, measurement, analysis and evaluation of EE performances by firms was conducted, in particular

regarding manufacturing firms (box on the left of figure 4). The result of bibliographical review is the gap analysis showed below. It refers both to EE PMS and KPIs.



#### 4: Research Questions & Research Objectives

With relation to the results of gap analysis, a generic, broad-spectrum RQ, has been formulated, and divided into two different "sub-Research Question", called RQ1 and RQ2. One or plus ROs has been associated to each sub-RQs: ROs are the goals this dissertation aims to achieve in order to answer effectively RQs. We underline that the development of RO2 hasn't been carried out in parallel to RO1, but it comes directly from RQ1, as we can see in the boxes below. The RO3, RO4, RO5 are the RO relating to RQ2, described below. We want to make clear the RO3 is the main goal referred to RQ2, which is divided into sub-goals RO4 and RO5.

##### RQ

*How we can improve Energy Efficiency in Manufacturing understanding implications between time-based performances and energy-related performances by integrating both of these perspectives?*

**RQ1:** *"What approach manufacturing companies can use in order to effectively select, understand, measure, and further develop energy efficiency performances?"*

**RO1:** Propose a multidimensional and scalable framework of Energy Efficiency Performance Measurement System, designed in order to be standardizable and flexible in terms of applicability within industry of discrete Manufacturing.

**RO2:** Use proposed framework for selecting the *most critical area* inside it considering prior needs of a decision support tool in energy management. RQ2 will be referred to this area.



**RQ2:** *"How we can support decision making in energy management of manufacturing companies through novel performance measures of energy consumption continuous improvement-oriented?"*

**RO3:** Develop a new methodology as a decision support tools for energy managers that enable analysis and improvement of performances of energy consumption based on design and use of proper Key Performance Indicators.

**RO4:** Design Energy KPIs point out in a detailed way efficiency grade of running operations and production management of plant towards energy consumption of analyzed resource.

**RO5:** Introduce guidelines for an effective use of Energy KPIs in firms, with the aim to allow a proper management of it by main actors in management and enable an improvement of energy-related performances through supplied information that come from Energy KPIs.

#### 5: Research Framework

Figure 5 shows the *Research Framework*, which represents, in a holistic way, the methodology adopted for the development of Research Objectives (RO), in order to answer effectively to Research Questions (RQ). On the top, the meaning of the general RQ formulated before is represented qualitatively. Every RO appears in figures as it is placed into the research framework. Core contents elaborated in dissertation have been numbered: "1" is referred to measurement of EE performances through a *Performance Measurement System Matrix*, "2" is referred to analysis of energy consumption through a cross view methodology for developing Energy KPIs, and "3" is referred to management of designed Energy KPIs system according to a continuous improvement approach. Support tools



used have been indicated in figure 5 too. In the energy view *state diagram* has been used, in the time view *Ishikawa diagram* has been used, and *Energy Diagram*, a tool purposely developed, has been used for generate Energy KPIs. The core aspects of each main point of framework is now briefly described.

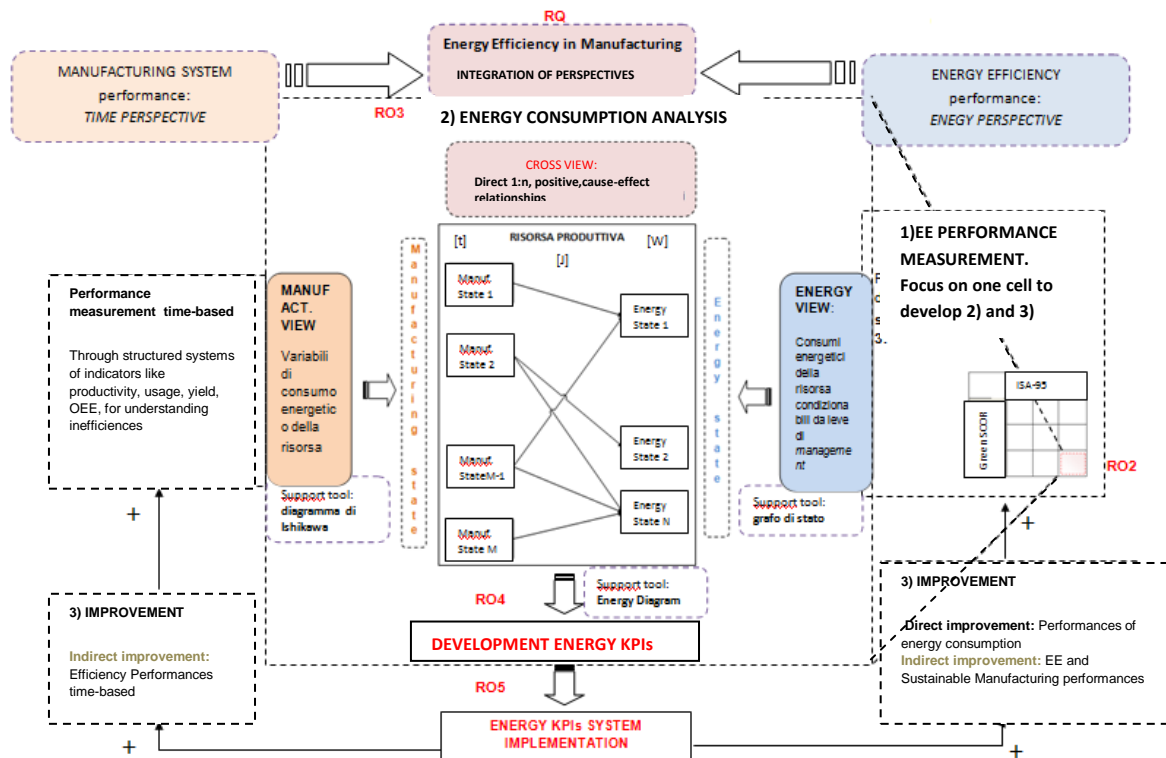


Figure 5 : Research Framework.

In regard to point “1) *EE Performance Measurement*”, in order to support the identification’s process of the area which methodology to develop Energy KPIs will take place in, a structured EE PMS has been formulated according to a matrix design (RO1), constituted by Level1 of the *Green SCOR Model -types of process-* and by the *Equipment Model* levels from ISA-95 standard. The methodological scope is formulated by circumscribing in PMS a specific area of development of new indicators (RO2): information brought by the gap analysis justify the selected choice.

The cross view methodology (explained at point “2” of framework) connects manufacturing states (power consumption’s variables, measured in [t]) to energy states (power requirement [W]), through cause-effect relationships, to get power consumptions connected to each of these states. These consumptions are represented in specific Energy Diagram, allowing to generate Energy KPIs. For “Energy KPI” we mean an indicator made up of energy consumption’s data and production’s data gathered by shop floor in discrete or continuous time and directed to highlight efficiency level of the different operations and management

of manufacturing system towards energy consumption of productive energy-consuming resource (RO4).

Energy Diagrams come from a time-based approach of building performance indicators, coherently with RQ. Here we debate two cases: an Energy Diagram “inspired” to the *Plant Status Diagram* and an Energy Diagram “inspired” to diagram of *Overall Equipment Effectiveness*. Energy KPIs represent “energy alter-ego” of efficiency time-based indicators, deducible by illustrated time-based diagrams.

Finally, Energy KPIs’ management system, from a *continuous improvement* point of view, aims to place generated indicators in a record sheet (Energy KPIs System Design), identify variables of energy consumption that mostly have shown energy inefficiencies through Energy KPIs’ analysis of values, and adopt an action plan to reduce the entity of these variables, thus to reduce both the amount of time and of energy.

Respect of performances of energy consumption, the improvement is considered *direct*, (RO5) while from the point of view of the performances of sustainable manufacturing and time-based, improvement is considered *indirect*.

## 6: Research Methodology

In this dissertation, research methodology adopted is the qualitative research methodology. In particular, *case study methodology* has been applied. Unit of analysis is structured in two different levels: in literature, current use and applications of EE KPIs have been explored, in a scope that embrace machine level up to enterprise and national level. Afterwards, once scope has been limited through *PMS Matrix*, the unit of analysis will be reduced to plant level. In particular, we will investigate how energy consumption of a machine tool is draw by management of operations and of production activities. For acting case study in this thesis, a semi-structured interview was arranged, divided into four distinct sections, each one with its own purposes.

Interview, addressed to experts of mechanical sector and of industrial production, works as qualitative validation. Adducing external information compared with those deducted from literature, it was able to:

- confirm or deny the hypothesis elaborated in dissertation;
- clarify some aspects regarding the needs of referential industry for which external sources are necessary;
- approve the relevance of methodology for selected industry, its application drivers, its benefits, its limits;
- fine-tune energy states, manufacturing states, cross view, and other accurate elements elaborated within the methodology.

Thus, interviews have been introduced in order to fine-tune the whole dissertation through contribution of information obtained, and to give an important feedback

for understanding how designed methodology could be implemented in a real context in firms. A case study supports validation, allowing to triangulate data gathered and enable to highlight some findings rising during development of methodology.

## **7: Conclusions and Future Developments**

In conclusion, we have assessed how research gaps have been satisfied by dissertation's contents. Besides, rising findings have been illustrated and divided into *theoretical implications* and *practical implications*. Finally, future developments of research work have been proposed. We think that research gaps showed before have been satisfied quiet well, in particular for those regarding the development of new KPIs at machine level, and the development of a methodology allow to exploit potential offered by energy monitoring and allow to identify inefficiencies at plant level. Gaps regarding development of a novel frameworks and conceptual frameworks remain partially unsatisfied; nevertheless, thesis offers a good basis for further future developments about that.

# INDICE DEI CONTENUTI

Capitolo 1 : INTRODUZIONE .....	1
1.1 Area di ricerca .....	1
1.1.1: Scenario attuale .....	1
1.1.2: Ragioni di interesse .....	5
1.1.3: Focus di ricerca .....	8
1.1.4: Industry di riferimento.....	12
1.2 Confini e obiettivi del lavoro .....	13
1.2.1: Confini del lavoro .....	14
1.2.2: Obiettivi del lavoro.....	17
1.3: Benefici e barriere all'efficienza energetica nelle organizzazioni.....	18
1.3.1: Benefici di miglioramento dell'EE nelle organizzazioni.....	18
1.3.2: Barriere al miglioramento dell'EE nelle organizzazioni.....	19
1.4 Struttura della trattazione .....	21
Capitolo 2 : REVISIONE BIBLIOGRAFICA .....	22
2.1: Background teorico.....	23
2.1.1: Misurazione delle performance .....	24
2.1.2: Key Performance Indicator .....	26
2.1.3: Efficienza energetica .....	30
2.1.4: Efficienza energetica nel manufacturing .....	36
2.1.5: Energy management .....	42
2.1.6: L'ICT a supporto all'efficienza energetica nelle organizzazioni.....	45
2.2: Key Performance Indicator di efficienza energetica .....	48
2.2.1: Dimensioni di classificazione dello stato dell'arte dei Key Performance Indicator di efficienza energetica .....	49
2.2.2: Stato dell'arte dei Key Performance Indicator di efficienza energetica .....	60
2.3: Monitoraggio, misurazione, analisi e valutazione delle performance di efficienza energetica .....	82
2.3.1: Monitoraggio delle performance di efficienza energetica.....	82
2.3.2: Sviluppo di nuovi KPI di efficienza energetica.....	83
2.3.3: PMS e Framework di indicatori di efficienza energetica.....	85
2.3.4: Analisi, valutazione e controllo delle performance energetiche .....	87

2.4: Gap Analysis.....	89
<b>Capitolo 3 : RESEARCH FRAMEWORK &amp; RESEARCH METHODOLOGY .....</b>	<b>92</b>
3.1: Research framework .....	92
3.1.1: Research Question & Research Objective .....	92
3.1.2: Research Framework.....	93
3.2: Research Methodology.....	104
<b>Capitolo 4 : SISTEMA di MISURA delle PERFORMANCE di EFFICIENZA ENERGETICA.....</b>	<b>107</b>
4.1: Background teorico .....	107
4.1.1: Progettazione e implementazione dei PMS .....	107
4.1.2: Definizione e selezione dei Key Performance Indicator .....	110
4.2: Progettazione di un <i>PMS Matrix</i> di efficienza energetica .....	112
4.2.1: Inizializzazione framework: KPI tester.....	112
4.2.2: Inizializzazione framework: dimensioni di progettazione.....	114
4.2.3: Prima dimensione: Livello 1 modello SCOR.....	115
4.2.4: Seconda dimensione: Equipment Model standard ISA-95.....	123
4.3: Utilizzo del PMS MATRIX di efficienza energetica: <i>scope</i> metodologico.....	124
<b>Capitolo 5 : METODOLOGIA <i>CROSS-VIEW</i> per lo SVILUPPO di ENERGY KPI per la MACCHINA UTENSILE .....</b>	<b>128</b>
5.1: Step 1 -Definizione del sistema produttivo di riferimento .....	130
5.2: Step 2- Energy View: definizione dei <i>power requirement</i> (stati energetici).....	139
5.3: Step 3 -Time/Manufacturing View: definizione delle <i>variabili di consumo energetico</i> (stati manfatturieri) .....	142
5.3.1: Caso 1: Time View productivity-based .....	145
5.3.2: Caso 2: Time View OEE-based .....	154
5.4: Step 4 - <i>Cross View</i> di collegamento tra Time View ed Energy View .....	157
5.4.1: Caso 1: Cross View productivity-based .....	160
5.4.2: Caso 2: Cross View OEE-based .....	161
5.5: Step 5 - <i>Energy Diagram</i> e generazione degli Energy KPI .....	162
5.5.1: Caso 1: Energy KPI sviluppati.....	164
5.5.2: Caso 2: Energy KPI sviluppati.....	172
5.6: Confronto qualitativo tra il caso productivity-based e caso OEE-based .....	179
5.7: Step 6- Energy KPI System Design & Implementation.....	180
5.7.1: Energy KPI System Design.....	181
5.7.2: Energy KPI System Implementation .....	184

5.8: Conclusioni e <i>finding</i> dalla metodologia Cross View .....	192
<b>Capitolo 6 : VALIDAZIONE .....</b>	<b>195</b>
6.1: Intervista semi-strutturata.....	195
6.2: Il caso di una fresatrice CNC nell'industry dell'automotive.....	197
<b>Capitolo 7 : CONCLUSIONI e SVILUPPI FUTURI .....</b>	<b>207</b>
7.1: Conclusioni.....	207
7.1.1: Soddisfazione gap di ricerca.....	207
7.1.2: <i>Finding</i> : implicazioni teoriche e pratiche.....	209
7.1.3: Benefici e limitazioni .....	214
7.2: Sviluppi futuri.....	216
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>218</b>
<b>GLOSSARIO .....</b>	<b>231</b>
<b>APPENDICE A .....</b>	<b>233</b>
Classificazione delle <i>Reference</i> .....	233
<b>APPENDICE B .....</b>	<b>237</b>
Figure /Tabelle di supporto.....	237
<b>APPENDICE C .....</b>	<b>243</b>
Intervista semi strutturata utilizzata per la validazione qualitativa della metodologia .....	243

## INDICE DELLE FIGURE

Figura 1.1: World total final energy consumption by region". Fonte: IEA, 2010. ....	1
Figura 1.2: "Global Energy Consumption in quadrillion Btu". Fonte: U.S Energy Information Administration. International Energy Outlook 2011. ....	2
Figura 1.3: World Resource Institute 2011; Fonte: IEA 2008, data from 2005. ....	2
Figura 1.4: "A model of sustainable development". Fonte: Azapagic & Perdan, 2000. ....	3
Figura 1.5: "Contribution of energy efficiency to the three main aspects of sustainable manufacturing". Fonte: Bunse et al, 2011. ....	4
Figura 1.6: Relazione tra efficienza energetica nel Manufacturing e riduzione di emissioni di CO <sub>2</sub> energy-related. Fonte: IEA (2008), World Resource Institute 2011 data from 2005. ....	4
Figura 1.7: Evoluzione delle performance chiave nel Manufacturing: motivazioni/driver di ricerca nell'area dell'EEM. ....	8
Figura 1.8: Step della metodologia adottata per l'individuazione del research focus. ....	11
Figura 1.9: Framework di individuazione del research focus. ....	12
Figura 1.10: Saving energetici ottenibili nei diversi settori produttivi sul totale dei costi dell'energia, con pbp di tre anni. Fonte: McKinsey, 2011. ....	13
Figura 1.11: Confini e obiettivi di lavoro. Rielaborato da "Enhancement of current ICT solutions in production". Fonte: Schönsleben 2007, Bunse and Vodicka 2011. ....	14
Figura 1.12: <i>Scope</i> della trattazione: <i>scope</i> in letteratura e sottoinsieme dello <i>scope</i> di metodologia. ....	16
Figura 1.13: Struttura della trattazione. ....	21
Figura 2.1: Framework di sviluppo del research gap. ....	22
Figura 2.2: Relazione tra misurazione delle performance e gestione delle performance. Fonte: Slizyte & Bakanauskiene, 2007. ....	25
Figura 2.3: Energy efficiency and energy savings. Fonte: Bunse, 2011, basata su Pehnt, 2010. ....	34
Figura 2.4: Lo stabilimento produttivo secondo un'ottica EEM <i>application domain-based</i> . Tratto da "System considered for the state of the art", Cannata, 2011. ....	36
Figura 2.5: "Energy Sources". Fonte: Pandolfo, 2010. ....	37
Figura 2.6: "Renewable and Non-renewable energy". Fonte: www.windy-future.info, 2010. ....	38
Figura 2.7: "Measures to increase energy efficiency of production facilities". Fonte: Müller et al. 2009, rielaborato da Bunse et al. 2011. ....	40
Figura 2.8: Dimensioni dell'EEM e focus nella trattazione. ....	41
Figura 2.9: ISO 50001: loop di miglioramento continuo. Fonte: <a href="http://www.iso50001.de/index.php?id=home&amp;L=1">http://www.iso50001.de/index.php?id=home&amp;L=1</a> ....	44
Figura 2.10: "ICT solutions for Energy Management in Production". Fonte: Bunse & Vodicka, 2011. ....	46

Figura 2.11: Il ruolo potenziale dell'ICT a supporto dei saving energetici. Fonte: The Climate Group, 2008. ....	47
Figura 2.12: "The Energy Efficiency Indicators Pyramid". Piramide multilivello dei dati costituenti gli indicatori di EE. Fonte: IEA, 2007. ....	51
Figura 2.13: Equipment Model. Fonte: ISA-95, from IEC 62264-1. ....	57
Figura 3.1: Research Framework.....	95
Figura 3.2: Fattori di contesto esterni ed interni che influenzano le operations industriali. ....	98
Figura 3.3: Diagramma Ishikawa standard: cause primarie ed effetto. ....	101
Figura 3.4: Struttura generale del diagramma di Ishikawa applicato all'interno della metodologia cross view. ....	102
Figura 3.5: Un diagramma a stati energetici.....	103
Figura 4.1: Three steps in designing and implementing a Performance Measurement System. Fonte: Bourne, 1999, adapted from Fitzgerald et al., 1991. ....	108
Figura 4.2: "Strategic Alygnment Pyramid". Fonte: Bauer, 2004. ....	111
Figura 4.3: I processi del modello SCOR lungo la SC. Fonte: Supply Chian Council. ....	117
Figura 4.4: I livelli di processo del modello SCOR. Fonte: Stephens, 2001. ....	118
Figura 4.5: I cinque tipi di processo del modello SCOR (Livello 1), detti anche processi di gestione.....	119
Figura 4.6: Equipment Model. Fonte: ISA-95, from IEC 62264-1. ....	123
Figura 5.1: Outline della metodologia Cross View.....	129
Figura 5.2: Driver di valutazione dell'applicabilità della metodologia ad un sistema produttivo. ....	131
Figura 5.3: "Common processes in discrete manufacturing". Fonte: Lamontagne, Kusik, Benson, & Wright, 2000.....	133
Figura 5.4: Classificazione a tre assi dei sistemi di produzione industriale. Fonte: Brandolese & Garetti, 1981. ....	134
Figura 5.5: Esempio generico di diagramma a stati energetici di una macchina utensile. ....	141
Figura 5.6: Diagramma di Ishikawa per il caso 1: Variabili di consumo energetico. ....	152
Figura 5.7: "OEE measurement tool and the perspectives of performance integrated in the tool". Fonte: (Muchiri & Pintelon, 2008). ....	154
Figura 5.8: Cross view caso 1. ....	160
Figura 5.9: Cross View caso 2. ....	161
Figura 5.10: Rappresentazione qualitativa dell'andamento della potenza nel tempo di una macchina utensile e visualizzazione dei consumi energetici per ciascun power requirement .....	162
Figura 5.11: Contributo del consumo relativo ai diversi stati energetici sul consumo totale del periodo T. ....	163
Figura 5.12: <i>Energy Diagram</i> caso 1.....	165
Figura 5.13: <i>Energy Diagram</i> caso 2.....	172



Figura 5.14: Matrice dei consumi energetici. ....	188
Figura 6.1: Flusso dei materiali e dei consumi elettrici in corrispondenza della fresatrice. Adattato da Gutowski, Dahmus, & Thiriez, 2006. ....	199
Figura 6.2: Diagramma a stati energetici per il caso in esame. ....	201
Figura 6.3: Matrice di consumo energetico nel caso di studio. ....	205
Allegato 1: Classification of sustainability oriented terms. Fonte: Glavick & Lukman, 2007. ....	237
Allegato 2: Energy Conversion Steps from Primary Energy to End-Users. Fonte: Morvay & Gvozdenac, 2008. ....	238
Allegato 3: Comparison between standards: ISO 50001: 2009 Energy Management e EN 16001: 2009 Energy Management. ....	239
Allegato 4: ISA-95 levels: Activity Model. Fonte: ....	240
Allegato 5: ISA-95: Multi-level functional hierarchy of activities. Fonte: ISA-95, from Figure 2 in IEC 62264-3. ....	240
Allegato 6: Power signature of spindle on in the ramp up state. Fonte: Prabhu & Taisch, Simulation Modeling of Energy Dynamics in Discrete Manufacturing Systems, -in corso-. ....	241
Allegato 7: Fonte: Prabhu & Taisch, Simulation Modeling of Energy Dynamics in Discrete Manufacturing Systems, -in corso-. ....	241
Allegato 8: Factors influencing energy and environmental performance Fonte: Morvay & Gvozdenac, Applied industrial energy and environmental management (2008). ....	242
Allegato 9: Diagramma dello stato dell'impianto. Fonte: Grandi & Trucco, 2005. ....	242

## INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1.1: Componenti <i>energy-consuming</i> di un impianto di produzione discreta e selezione della componente <i>in scope</i> della trattazione.....	15
Tabella 2.1: Definizioni associate alle tre terminologie riguardanti la misura delle performance. ....	24
Tabella 2.2: "KPI structure". Fonte: ISO/DIS 22400-2, 2011. ....	29
Tabella 2.3: "Classification of approaches to energy efficiency". Fonte: Audzeyeva, 2010. ....	39
Tabella 2.4: Relazione tra la dimensione di decision-making, la dimensione temporale, e la dimensione del livello di aggregazione dei dati, con annesso SI. ....	55
Tabella 2.5: Decision-making in manufacturing". Fonte: Cannata, 2011, rielaborato da Reich-Weiser et al., 2008. ....	56
Tabella 2.6: Dimensioni adottate per la classificazione dello stato dell'arte dei KPI di EE.....	59
Tabella 2.7: KPI termodinamici. ....	69
Tabella 2.8: KPI fisico-termodinamici. ....	75
Tabella 2.9: KPI economico-termodinamici .....	77
Tabella 2.10: KPI economico-fisici .....	78
Tabella 2.11: KPI economici.....	80
Tabella 2.12: KPI eco-efficiency.....	81
Tabella 4.1: KPI di EE tester. ....	113
Tabella 4.2: Descrizione dei cinque processi di gestione del modello SCOR. .	119
Tabella 4.3: Descrizione dei cinque processi di gestione del modello Green SCOR, con relativo impatto ambientale. ....	121
Tabella 4.4: Framework Concettuale di PMS di efficienza energetica.....	124
Tabella 5.1: Template per la definizione del sistema produttivo. ....	138
Tabella 5.2: I diversi power requirement della macchina utensile considerati nella trattazione e relativa descrizione. ....	140
Tabella 5.3: Descrizione degli stati manifatturieri per il caso 1.....	146
Tabella 5.4: Esempio di categorizzazione degli stati manifatturieri nel caso del cluster di Maintenance. ....	153
Tabella 5.5: Descrizione degli stati manifatturieri per il caso 2.....	156
Tabella 5.6: Confronto tra il caso productivity-based e caso OEE-based.....	179
Tabella 5.7: Esempio variabili di II livello relativo all'esempio di riduzione del valore di $E_{avail}$ . ....	190
Tabella 6.1: Identificazione del sistema produttivo di riferimento nel caso in esame. ....	200
Tabella 6.2: Power requirement in fresatrice "Automated Milling Machine". Fonte: ....	201
Tabella 6.3: Consumi energetici nel caso d'uso. ....	203
Tabella 6.4: Calcolo Energy KPI per il caso d'uso.....	204

Tabella 7.1: Grado di soddisfazione dei gap di ricerca da parte della trattazione.  
..... 208



## Capitolo 1 : INTRODUZIONE

Il primo capitolo del lavoro è suddiviso in quattro sezioni: 1.1:Area di ricerca, 1.2:Confini e obiettivi del lavoro, 1.3:Benefici e barriere all'efficienza energetica nelle organizzazioni e 1.4:Struttura della trattazione. La prima sezione presenta lo scenario competitivo attuale, le ragioni di interesse che motivano la trattazione e il focus specifico di ricerca all'interno dell'area di ricerca analizzata. La seconda sezione definisce lo scope della trattazione e gli obiettivi del lavoro di ricerca, mentre la terza sezione mostra i benefici e le barriere di implementazione dell'efficienza energetica nelle organizzazioni. L'ultima sezione descrive qualitativamente la struttura dell'elaborato nelle sue parti fondamentali.

### 1.1 Area di ricerca

#### 1.1.1: Scenario attuale

Attualmente lo scenario in cui le aziende si trovano ad operare risulta caratterizzato da prezzi crescenti ed estremamente volatili dell'energia, forniture incerte della stessa, una maggior attenzione verso il problema del riscaldamento globale e dei cambiamenti climatici e verso il problema della gestione delle risorse scarse, dal momento che il consumo di energia finale a livello globale è cresciuto dal 1973 al 2008 dell'80% (ovvero da 4676 Mtoe<sup>1</sup> a 8428 Mtoe) (EIA, 2010) ,come mostrato in figura 1.1, e si evince come sia destinato ad aumentare.

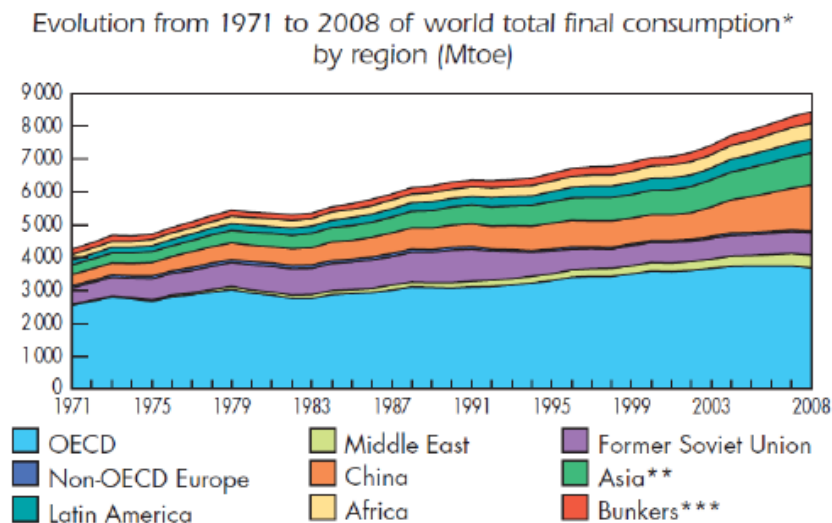


Figura 1.1: World total final energy consumption by region". Fonte: IEA, 2010.

<sup>1</sup> Il toe rappresenta la quantità di energia rilasciata dalla combustione di una tonnellata di petrolio grezzo. 1 toe = 41.868 GJ secondo l'IEA. È un'unità di misura usata per rendere più maneggevoli le cifre relative a grandi valori di energia.

Anche altri studi hanno descritto lo stesso trend: secondo l'IEA (2010) e l'EIA (2010) ci si aspetta per il 2030 una crescita della produzione di energia a livello globale tra il 15% e il 35%, a seconda delle policy e i programmi che i governi decideranno di mettere in atto, trend in crescita fortemente trainato da Cina ed India come mostra la figura 1.2.

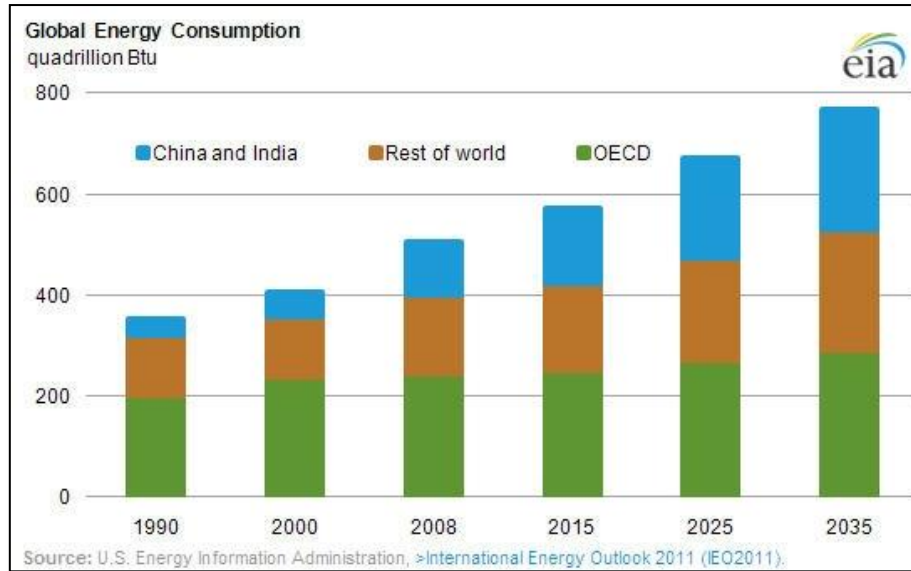


Figura 1.2: "Global Energy Consumption in quadrillion Btu". Fonte: U.S Energy Information Administration. International Energy Outlook 2011.

Un ulteriore elemento dello scenario attuale è dunque la crescente pressione in termini di normative e di policy per quanto concerne la riduzione dei consumi energetici e conseguentemente delle emissioni. Seppur questi siano motivi di attenzione da parte di tutte le industry, in particolare il settore del Manufacturing necessita di un focus più specifico, in quanto responsabile di quasi il 33% dei consumi di energia primaria e del 38% delle emissioni di CO<sub>2</sub> (IEA, 2008), come mostrato in figura 1.3; mentre a livello europeo sono attribuibili al Manufacturing ben il 40% dei consumi di energia elettrica e il 30-40% delle emissioni di GHG (EEA, 2010).

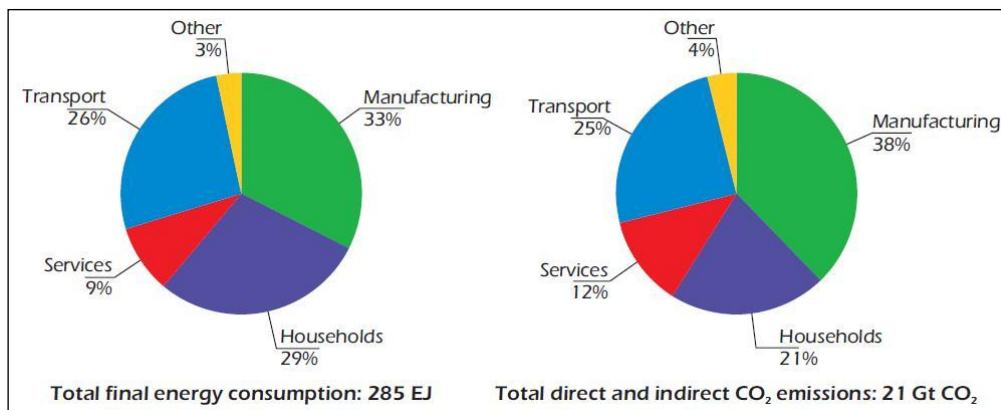


Figura 1.3: World Resource Institute 2011; Fonte: IEA 2008, data from 2005.

Da ciò ne consegue che lo sviluppo sostenibile debba essere una guideline portante di tutte le attività del Manufacturing<sup>2</sup> affinché possa soddisfare le correnti e le future esigenze di riduzione del consumo energetico e di emissioni di CO<sub>2</sub>, per i quali questo settore sarà chiamato ad intervenire con una pressione sempre maggiore nel tempo. Lo sviluppo sostenibile è “uno sviluppo che soddisfa i bisogni del presente senza compromettere la possibilità delle generazioni future di soddisfare i propri bisogni”, (Brundtland, 1987).

Una rappresentazione del modello dello sviluppo sostenibile, declinato nella sua *triple bottom line*<sup>3</sup>, è riportata in figura 1.4.

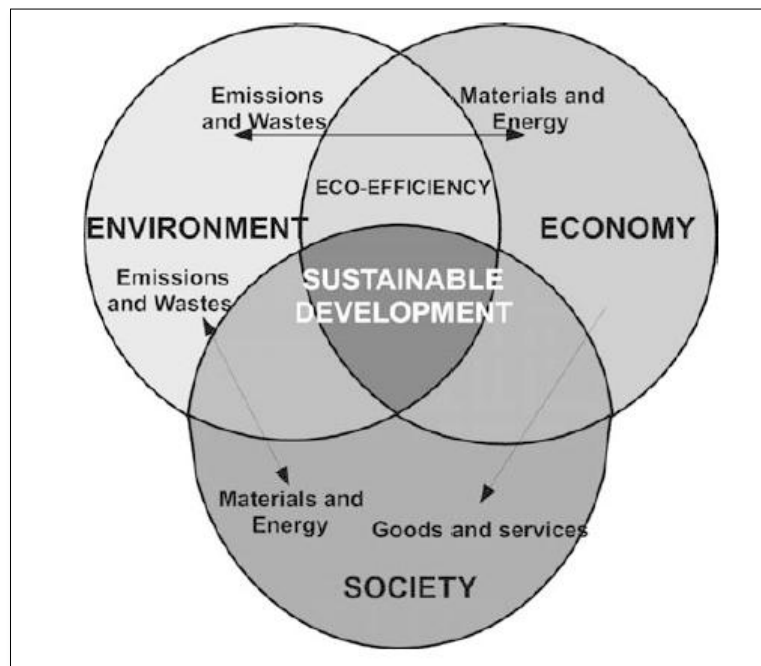


Figura 1.4: "A model of sustainable development". Fonte: Azapagic & Perdan, 2000.

La “macroarea” di ricerca del lavoro è dunque il *sustainable manufacturing*. Tra le diverse definizioni esistenti in letteratura viene riportata quella emessa dal Lowell Center for Sustainable Production: “La produzione sostenibile è la creazione di prodotti e servizi utilizzando processi e sistemi che sono non inquinanti, che preservano l’energia e le risorse naturali, economicamente profittevoli, sicuri e salutaris per i dipendenti, la comunità e i consumatori, e socialmente e creativamente gratificanti per tutti i dipendenti”.

L’International Energy Agency (IEA) in “Assessing measures of energy efficiency performance and their application in industry” (2008b) afferma come un utilizzo

<sup>2</sup> In questa trattazione verrà utilizzato il termine “Manufacturing” in riferimento all’industry, e “manufacturing” in riferimento alla produzione.

<sup>3</sup> L’approccio *triple-bottom-line* significa che le imprese sviluppano investimenti sostenibili e decisioni societarie partendo dalla base (bottom), e perseguendo simultaneamente tre obiettivi (triple-line): un’equità sociale, una qualità ambientale, una prosperità economica. (Fonte: Responsabilità sociale delle imprese : le indicazioni europee e l’esperienza italiana, CNA).

più efficiente dell'energia disponibile sia una uno degli approcci che meglio consentano di venire incontro all'esigenza crescente di rendere le organizzazioni maggiormente sostenibili.

Il sustainable manufacturing racchiude in sé una terminologia di principi, approcci, sotto-sistemi e sistemi estremamente variegata ed eterogenea (Glavick & Lukman, 2007). L'utilizzo di fonti rinnovabili è un esempio di soluzione ugualmente orientata alla sostenibilità, ma anche di una soluzione di lungo termine, a differenza di un utilizzo più efficiente dell'energia che è in grado di apportare un contributo di breve termine, elevato ed economico (EESI).

L'efficienza energetica (EE) contribuisce dunque in maniera significativa ad una migliore produzione sostenibile: essa si inserisce in tutti e tre gli aspetti della *triple bottom line* considerati all'interno del sustainable manufacturing, come mostrato in figura 1.5.

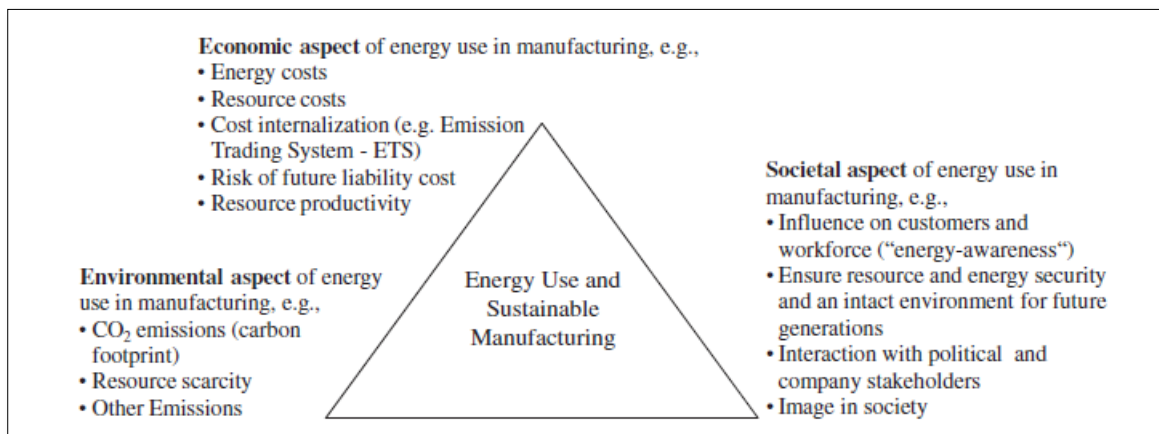


Figura 1.5: "Contribution of energy efficiency to the three main aspects of sustainable manufacturing". Fonte: Bunse et al, 2011.

La Figura 1.6 mostra come l'EE realizzata in ambito industriale possa essere connessa quantitativamente all'aspetto ambientale, oltre che naturalmente all'aspetto economico.

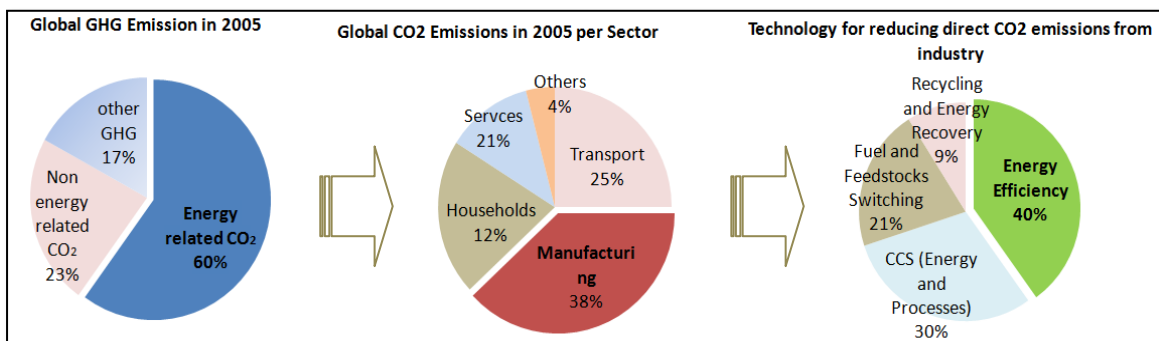


Figura 1.6: Relazione tra efficienza energetica nel Manufacturing e riduzione di emissioni di CO<sub>2</sub> energy-related. Fonte: IEA (2008), World Resource Institute 2011 data from 2005.

Sul totale delle emissioni globali di gas serra (GHG) l'IEA, (2008) ha calcolato una percentuale del 77% di emissioni di CO<sub>2</sub>, di cui il 60% di esse sono



direttamente imputabili al consumo dell'energia, e –come visto in Figura 1.3- tenendo presente che il Manufacturing è responsabile del 38% delle emissioni di CO<sub>2</sub>, ha stimato la possibilità di ridurre fino al 40% le emissioni di CO<sub>2</sub> attraverso leve di EE all'interno del settore industriale in un orizzonte temporale che si estende fino al 2050.

In particolare, Herrmann & Thiede (2009) considerano il *consumo energetico* come l'aspetto più importante e determinante in questo scenario di crescente aumento dei prezzi dell'energia e pressioni su temi ambientali, in particolar modo in ottica di pianificazione e gestione degli impianti di produzione.

### 1.1.2: Ragioni di interesse

Nel passato, le performance considerate nel Manufacturing comprendevano soltanto le classiche "manufacturing five golden metric" di costo, qualità, tempi di risposta, sicurezza, e tempi di ciclo, trascurando dunque l'EE. A tal proposito si analizza ora, nello specifico, l'impatto dei diversi fattori di contesto all'interno del Manufacturing, che servirà a mettere in luce l'esistenza di effettivi driver all'introduzione di efficienza energetica nel manufacturing (EEM), che altro non sono che le principali motivazioni portanti sulla quali si poggia la ricerca effettuata:

- Crescita dei prezzi dell'energia: la crescita del prezzo del petrolio e di altri combustibili fossili, dovuta alla scarsità delle specifiche risorse, ha reso la riduzione dei consumi energetici un fattore di primaria importanza per le aziende manifatturiere (Mukherjee, 2008). Nelle industry ad elevata intensità energetica (per esempio acciaio, cemento, carta e chimiche) il costo dell'energia può costituire fino al 60% dei costi operativi, rappresentando dunque un forte fattore per la competitività (IEA, 2007). Nelle industry non intensive dal punto di vista energetico, per esempio quelle dell'ingegneria meccanica, la spesa energetica rappresenta circa il 2% o 3% di tutti i costi operativi (Ramírez, 2005). Ad ogni modo, a prescindere dal tipo di industry, occorre considerare che attualmente circa il 90% dei consumi energetici globali deriva da fonti non rinnovabili (IEA, 2008), e di conseguenza un utilizzo più efficiente dell'energia rappresenta la soluzione di breve termine al problema della crescita dei consumi energetici e delle emissioni (EC, Action Plan for Energy Efficiency: Realising the Potential., 2006) mentre lo sviluppo e il miglioramento delle tecnologie delle energie rinnovabili si collocherebbe come soluzione di lungo termine;
- Nuove norme ambientali per i consumi energetici e le emissioni di CO<sub>2</sub>: col Protocollo di Kyoto del 1997 (UN, 1988) e anche con l'Accordo di Copenhagen del 2009 (UNFCCC, 2010) i Paesi di tutto il mondo si sono impegnati a ridurre significativamente le emissioni di gas serra (GHG)

entro la prossima decade; in particolare, in ambito europeo, l'EC ha posto come target la riduzione almeno del 20% dei GHG e del 20% del consumo di energia primaria entro il 2020 (EC, 2008). Oltretutto sono state introdotte in diversi Paesi differenti policy e normative market-oriented come tasse, sovvenzioni, permessi di emissione acquistabili e *green certificates* (Groot, 2011), (Morthorst, 2001). Questo significa che le aziende che migliorano la loro efficienza energetica e conseguentemente la loro impronta di carbonio sono le aziende che meglio di ogni altre saranno in grado di affrontare le sfide derivanti dalle attuali e future normative riguardanti il CO<sub>2</sub>. L'IEA (IEA, 2008) stima infatti come circa il 40% della riduzione potenziale delle emissioni attribuibili a questa industry siano ottenibili attraverso l'EE tra le diverse tecnologie disponibili. Assieme alle nuove normative occorre inoltre considerare i numerosi standard internazionali e/o linee guida per una più "efficiente" implementazione delle soluzioni di EE (Ishikuma, 2011); a titolo di esempio vengono riportate la IEC/TC65/JWG14: Energy Efficiency through Automation Systems (ISO 20140: Unit Process Model, ISO 22400:Key Performance Indicator, ISO 50001:Energy Management Systems), la ISO/SAG-E:Energy Efficiency and Renewable Energy Sources, la ISO/PC242 : Energy Management.

- I clienti stanno progressivamente cambiando il loro comportamento di acquisto nei confronti di prodotti e servizi "green": aziende e utenti finali considerano l'efficienza energetica un importante criterio nelle loro decisioni di acquisto (McKinsey Deutschland, 2009). Sebbene l'attenzione dei clienti non sia essenzialmente rivolta all'EE nella fase di produzione, è proprio l'EE in produzione che può costituire il più importante fattore che permette di ridurre l'impatto ambientale complessivo del prodotto. Oltretutto le aziende manifatturiere hanno constatato come performance ambientali superiori possano apportare un vantaggio competitivo e a livello di reputazione (Jovane, 2008), (Sutherland, 2008). Dal momento che l'efficienza energetica nel manufacturing ha un impatto significativo nelle performance ambientali dei prodotti, essa può diventare un importante driver di competitività per questo tipo di industry (Bunse, Vodicka, Schönsleben, Brühlhart, & Ernst, 2011);

Bunse et. al (2011) hanno presentato questi primi tre fattori di contesto in qualità di driver di miglioramento dell'EE; tuttavia dalla ricerca bibliografica eseguita si ritiene che esistano altri due fattori più "soft" assimilabili a due ulteriori driver di EEM:

- La letteratura e le pratiche comuni adottate mostrano che sebbene il settore del Manufacturing abbia realizzato miglioramenti continui

nell'efficienza energetica, il potenziale beneficio economico della stessa non sia stato ancora pienamente compreso e sfruttato (EC, 2010), (Eichhammer W. , 2004), (IEA, 2008), a causa di una serie di barriere che verranno discusse successivamente a pag. 18. Uno degli studi che confuta il pensiero comune che l'EE non vada di pari passo con la creazione di valore è lo studio "Energy Efficiency in Manufacturing" (Gesellschaft, 2008) che sottolinea la rilevanza dei processi produttivi sia nel singolo stabilimento che su base globale, mettendo il luce come un aumento dell' EE dei processi produttivi ottimizzati sia le performance economiche che ambientali. Oltretutto l'IEA (2008b) ha stimato un saving potenziale di 18.9 EJ/anno and 1.6Gt CO<sub>2</sub>/anno raggiungibile per il 2030, corrispondente a quasi il 7% del consumo energetico totale (IEA, 2008b). Si può dunque concludere che accanto alle esigenze di miglioramenti dell' EEM, esiste anche un ampio margine di miglioramento ed un elevato potenziale che fino a questo momento non è stato sfruttato e che per questo motivo si colloca come un ulteriore fonte di vantaggio competitivo per le aziende e conseguentemente come ulteriore driver di EEM;

- In ragione ai fattori caratterizzanti lo scenario attuale esaminati precedentemente, e in ragione al potenziale raggiungibile, gli attori più importanti del mondo delle industry e del mondo accademico discutono di queste tematiche all'interno delle European Technology Platforms (ETP), al fine di compilare una serie di roadmap di ricerca concordate che mettano in rilevanza i più importanti argomenti di ricerca per il futuro. Un esempio nell'area del sustainable manufacturing è la "Strategic multi-annual roadmap" compilata dall'EFFRA (European Factories of the Future Research Association), che include tra tutti i suoi aspetti di ricerca temi come "Ecofriendly Factories" e "ICT-enabled Intelligent Manufacturing". Per quanto concerne in maniera più specifica l'EE i primi sforzi concreti da parte delle organizzazioni internazionali sono cominciati intorno agli anni '90, nello sviluppo di metodi per misurare e monitorare l'evoluzione dell'EE in vari settori e Paesi. Il database ODYSSEE, messo in funzione dall'ADEME3 nel 1992, raccoglie un numero importante di iniziative, e ha posto le basi del programma "Energy Efficiency Policies and Indicator" (EEI) di WEC<sup>4</sup>, del progetto dell'IEA "Energy Indicators" iniziato nel 1997. Tutte queste forze messe in campo dimostrano l'esigenza, e conseguentemente una forte domanda, di approcci e soluzioni intelligenti e multidisciplinari per dirigere il manufacturing verso una visione "eco-factory", efficiente e sostenibile<sup>5</sup>.

<sup>4</sup> <http://www.worldenergy.org/documents/enefftofr.pdf>, <http://wec-indicators.enerdata.eu/>

<sup>5</sup> Quest'ultimo rappresenta un driver di EEM più "soft" rispetto agli altri, poiché l'esistenza di una crescente attenzione verso queste tematiche da parte di industry e ricerca sono chiaramente motivate dai driver di EEM illustrati precedentemente. Si ritiene comunque opportuno inserirlo come driver all'interno di un lavoro di ricerca in quanto esso contribuisce ad evidenziare un alto commitment esistente.

La Figura 1.7 sintetizza quanto esaminato, ovvero l'esistenza di precisi e riconosciuti driver/motivazioni di ricerca nell'area dell' EEM che determinano un cambio di direzione tra situazione passata e trend futuri.

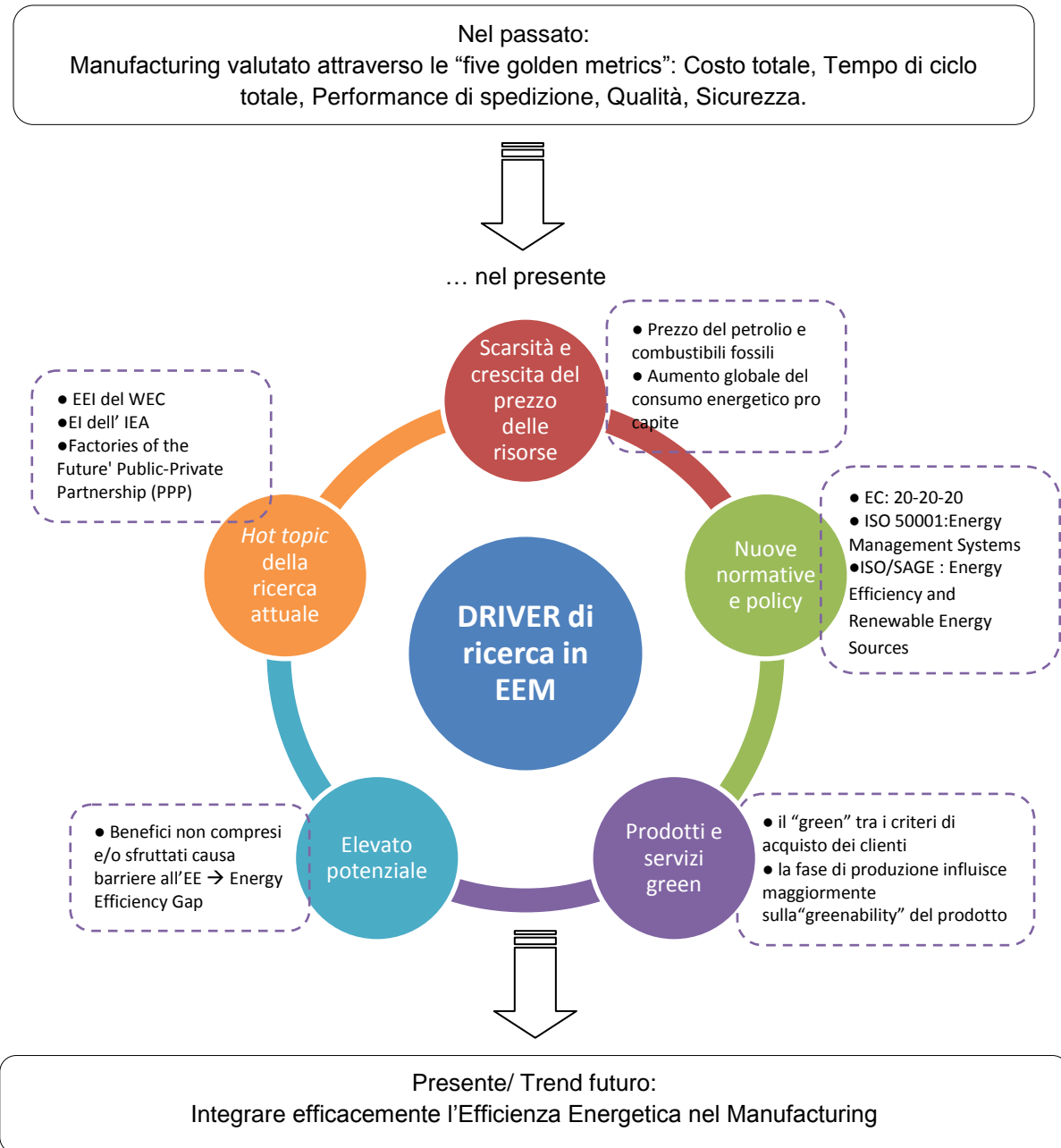


Figura 1.7: Evoluzione delle performance chiave nel Manufacturing: motivazioni/driver di ricerca nell'area dell'EEM.

### 1.1.3: Focus di ricerca

Si conclude dunque che esistono significativi driver all'introduzione dell'EE nel Manufacturing, ovvero alla considerazione dell'EE come ulteriore “metrica d'oro” grazie alla quale le aziende di questo settore potranno rimanere competitive o accrescere la loro posizione competitiva.

E' necessario però valutare *in che modo* l'EE possa essere efficacemente introdotta nella produzione industriale.

In letteratura, il tema dell'EEM è costellato da innumerevoli research topic, indice del fatto che l'EEM possa essere proposto attraverso approcci e modalità estremamente eterogenee: Vodicka, Banik, & Bunse (2009) si sono a tal proposito occupati di raccogliarli e analizzarli sotto opportune dimensioni, per una maggior comprensione del panorama di EEM attualmente esistente. Esempi di research topic di EEM possono essere "Energy Recovery", "Decentralized Power Supply", "Energy Management and Life Cycle Orientation Design", "Production Process", ecc.

Per l'individuazione di un research topic rilevante e *committed* da parte degli attori internazionali attualmente coinvolti all'interno dell'EEM, sono stati consultati i risultati delle indagini elaborate dall'Intelligent Manufacturing Systems<sup>6</sup> (IMS) nell'ambito del progetto IMS2020.

Sono cinque le aree di ricerca dell'IMS2020, chiamate Key Area Topics (KAT): Sustainable Manufacturing, Energy Efficient Manufacturing, Key Technologies, Standards, and Education. Per questa trattazione ci si riferisce chiaramente ai risultati dell'area chiave dell' Energy Efficient Manufacturing. Su 161 risposte, il tema di ricerca dell'EEM relativamente al research topic (RT<sup>7</sup>) "Energy-aware manufacturing processes – measurement and control", ha ottenuto un punteggio di 3,14, su una scala [1,4] dove 1 sta per "bassa rilevanza" e 4 sta per "alta rilevanza", a differenza di altri temi alternativi quali il miglioramento dell'EE attraverso un utilizzo più efficiente delle materie prime o le tecnologie che accedano a combustibili alternativi e materie prime derivanti dagli scarti, e altre tematiche relative.

Per "Energy-aware manufacturing processes – measurement and control" si intende "lo sviluppo di un sistema di misura e controllo dell'energia che utilizzi le informazioni provenienti da sensori e processi di misura interni (IMS2020) assieme ad un appropriato sistema di misura delle performance di efficienza energetica. Questo sistema di controllo richiede l'integrazione di una serie di concetti che abilitino la valutazione, il controllo e il miglioramento dell'efficienza nei processi produttivi". Circa l'86% dei partecipanti al programma ha confermato l'interesse in una ricerca collaborativa in questo topic, sia ora che nei prossimi anni.

---

<sup>6</sup> L'IMS è un programma di ricerca internazionale, industry-driven, e collaborativo, che ha sviluppato il progetto IMS2020 con l'obiettivo di supportare il futuro ambiente di produzione con una roadmap che evidenzia le milestone principali per le future attività e le esigenze dei sistemi di produzione.

<sup>7</sup> "RT" è l'acronimo utilizzato in riferimento allo specifico research topic investigato all'interno della trattazione. Nell'indagine realizzata nell'IMS2020 questo è il sesto research topic (RT6) all'interno di un set di 11 research topic appartenenti alla KAT "Energy Efficiency Manufacturing". L'RT6 fa parte di un sottogruppo del KAT di Energy efficiency di nome "Management and control of energy consumption".

Come si appurerà nel paragrafo 2.1.5: **Energy management** a pag. 42, questo RT risulta strettamente connesso al tema dell'Energy Management (EM), dal momento che “i concetti che abilitino la valutazione, il controllo e il miglioramento dell'efficienza nei processi produttivi” sono proprio quelli dell'Energy Management, giacché è strutturato secondo il noto loop *Plan Do Check Act* (PDCA) orientato al miglioramento continuo delle performance di EE. Nel paragrafo 2.1.5 verranno esplorate le definizioni e gli standard relativi all'Energy Management, al momento si riporta la definizione di Energy Management selezionata come riferimento nella trattazione: “l'energy management è l'applicazione di risorse dirette alla fornitura, conversione, e utilizzo dell'energia che essenzialmente coinvolgono il monitoraggio, la misura, la registrazione, l'analisi, l'esame critico, il controllo, il reindirizzamento e il miglioramento dei flussi di energia e di materiali attraverso sistemi che consentano di spendere la minor quantità di energia per il raggiungimento degli obiettivi interessati” (O'Callaghan, 1977, adattata da Bunse, 2011).

L'EM può essere dunque inteso come l'*approccio* attraverso cui il RT individuato può essere declinato in una nuova metodologia che abiliti il miglioramento delle performance energetiche.

D'altra parte, sempre in relazione al tema di “Energy-aware manufacturing processes – measurement and control” la progettazione e/o l'utilizzo di appropriati Key Performance Indicators (KPI) all'interno dei sistemi di misura è chiaramente parte integrante della realizzazione di sistema di misura orientato al miglioramento continuo (come si vedrà in dettaglio nel paragrafo 2.1.1: *Misurazione delle performance* a pag.24).

I KPI e sistemi di misura delle performance (PMS, performance measurement system) all'interno dei quali essi sono organizzati possono essere intesi dunque come il *tool* che permette di declinare il RT individuato in una nuova metodologia che abiliti il miglioramento delle performance energetiche.

Ci si potrebbe altresì domandare se esista una relazione, e soprattutto una coerenza, tra l'*approccio* individuato (EM) e il *tool* individuato (KPI e sistemi di misura delle performance) per lo sviluppo del research topic in una nuova metodologia. La conferma di uno stretto legame tra EM e KPI è comprovata, oltre che dall'evidenza, anche dalla letteratura: metodi appropriati di misura dell'efficienza energetica ed informazioni energy-related ottenibili attraverso processi di aggregazione dei dati raccolti dallo shop floor sono essenziali per poter rendere effettivo ed intensificare il decision making orientato all'EE delle aziende manifatturiere, in quanto rendono visualizzabili e comprensibili le aree di debolezza, il potenziale di miglioramento, e aiutano la formulazione di progetti e strategie future.

Queste affermazioni, mostrando non solo la coerenza ma anche l'appropriatezza e la funzionalità della progettazione e dell'utilizzo di KPI a supporto dell'EM, validando la formulazione di *come* ci si propone di sviluppare il research topic

all'interno del lavoro di ricerca. Oltretutto, iniziative di sviluppo di KPI e di sistemi che abilitino il miglioramento delle performance di EE sono attualmente discusse a livello globale e orientate strettamente alla visualizzazione del consumo energetico.

Si conclude dunque che il focus di ricerca tratta i sistemi di misura delle performance energy-related in qualità di *decision support tool* dell'EM.

La Figura 1.8 riassume quanto illustrato nell'intera sezione 1.1 di esplorazione dell'area di ricerca e individuazione del focus della trattazione, elencando gli step logici attraverso cui viene circoscritto il focus di ricerca.

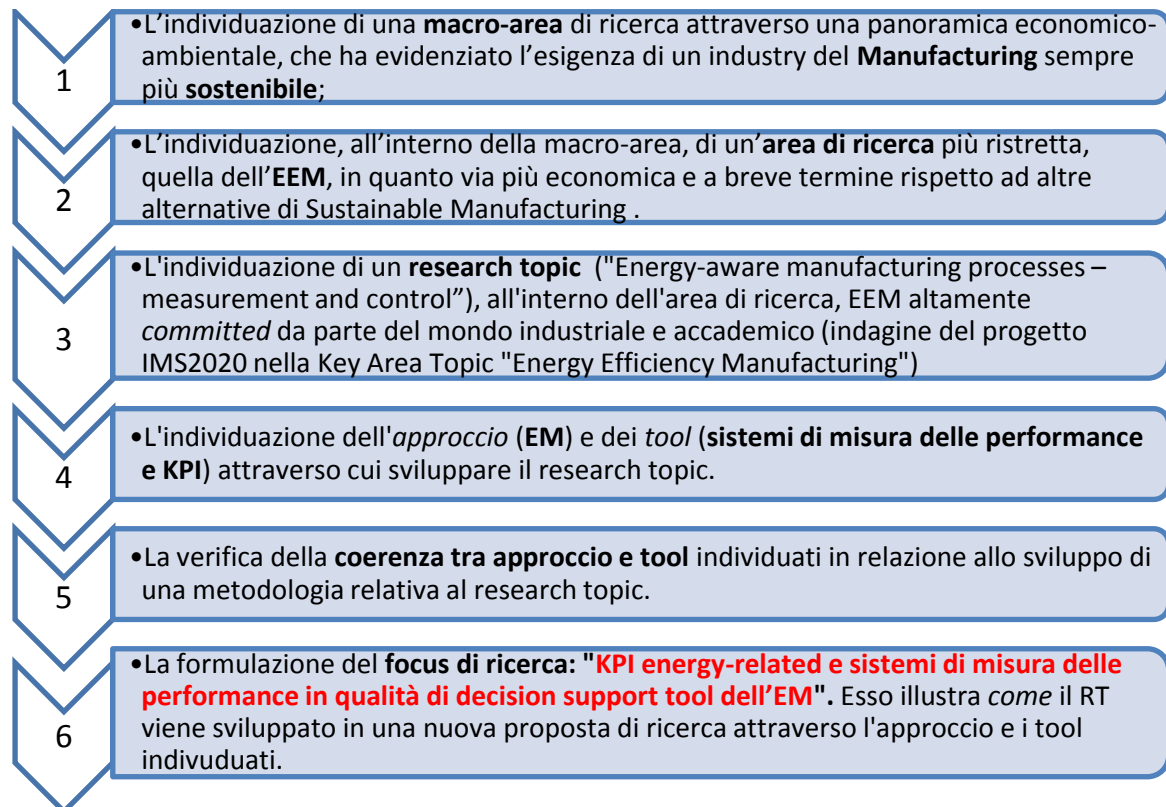


Figura 1.8: Step della metodologia adottata per l'individuazione del research focus.

La Figura 1.9 alla pagina successiva considera -analogamente alla figura 1.8- i diversi livelli di dettaglio dell'area di ricerca fino ad arrivare al focus di ricerca, con la sola differenza che essa non mostra il processo di definizione del research focus attraverso step successivi, ma attraverso le relazioni logiche di inclusione dei diversi "topic" trattati nella sezione 1.1, separando una loro prospettiva accademica "esterna" (quali aree di ricerca esistono in letteratura, e come sono organizzate), dalla prospettiva "interna" (qual è il focus di ricerca, e come ci si propone di svilupparlo in termini di approcci e strumenti adottati). Oltretutto la figura 1.9 mostra gli impatti del contributo di un lavoro di ricerca orientato al focus individuato sulle aree di ricerca.

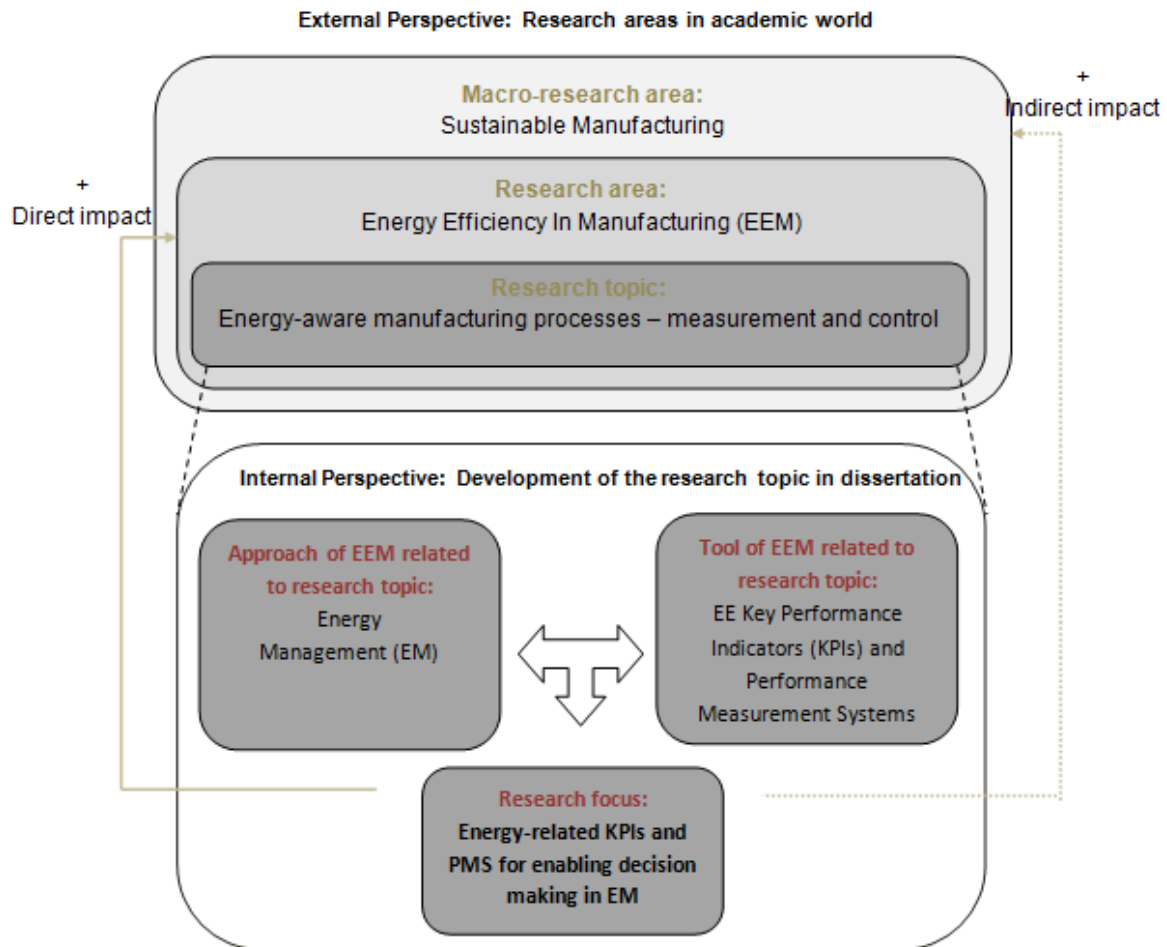


Figura 1.9: Framework di individuazione del research focus.

#### 1.1.4: Industry di riferimento

All'interno dell'industry del Manufacturing esistono diverse casistiche "energetiche". Come visto precedentemente, all'interno delle industry *energy-intensive* (ovvero quelle di processo) esiste un grosso impatto del costo dell'energia sui costi totali operativi, ragion per cui esse affrontano già da tempo il problema dell' EE. Quanto fatto per le industry *non-energy intensive* è invece tuttora insufficiente: come affermato da Rohdin et al. (2006), gli studi attualmente svolti per le industry non-energy intensive sono piuttosto scarsi, nonostante i costi dell'energia impattino con una parte non trascurabile sui costi totali industriali; per questo motivo il lavoro di ricerca sarà rivolto a questo tipo di industry, ovvero quella della produzione discreta.

La metodologia presentata in questa trattazione è progettata in maniera flessibile, tale da poter essere applicata alle molteplici industry appartenenti al *discrete Manufacturing*: esempi sono l'industry dell'elettrico, del meccanico, dell'automotive.



L'industria dell'automotive, storicamente presente nel territorio e nell'economia italiana, è stata selezionata come industria impiegata per la validazione di tale metodologia. Alla metodologia proposta è stato associato uno schema di riferimento articolato in tre dimensioni di classificazioni atto a valutare qualitativamente la bontà dell'applicazione della metodologia in un certo sistema. In relazione alla combinazione dei tre criteri di valutazione, l'automotive (o più propriamente, i processi produttivi in automotive) risulta un settore della produzione discreta ben adatto a questo tipo di applicazione. Uno studio di McKinsey riporta in Figura 1.10 i saving energetici ottenibili dall' *Automotive and Assembly* come da altri settori del Manufacturing, in termini percentuali rispetto al totale dei costi dell'energia.

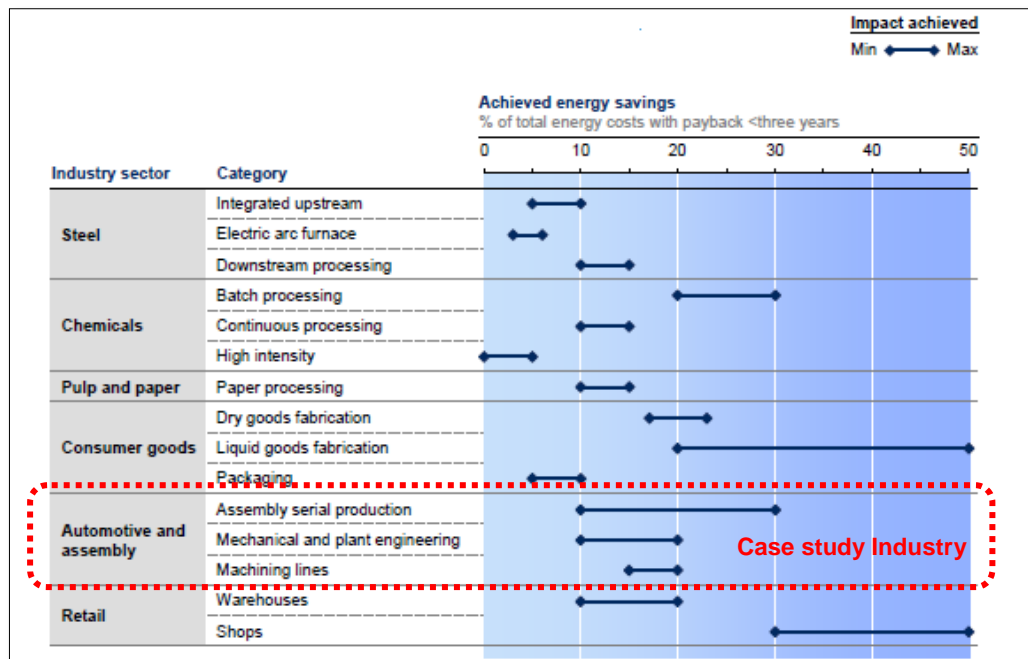


Figura 1.10: Saving energetici ottenibili nei diversi settori produttivi sul totale dei costi dell'energia, con pbp di tre anni. Fonte: McKinsey, 2011.

Per la validazione sono stati inoltre consultati esperti del settore della meccanica, dell'automotive e della produzione industriale.

Ad ogni modo la metodologia adottata per la validazione verrà riportata in dettaglio nel capitolo 3: *Research Framework & Research Methodology* a pag.92.

## 1.2 Confini e obiettivi del lavoro

La Figura 1.11 si propone di illustrare in maniera sintetica e qualitativa i confini e gli obiettivi del lavoro, espliciti formalmente nei paragrafi 1.2.1 e 1.2.2 rispettivamente.

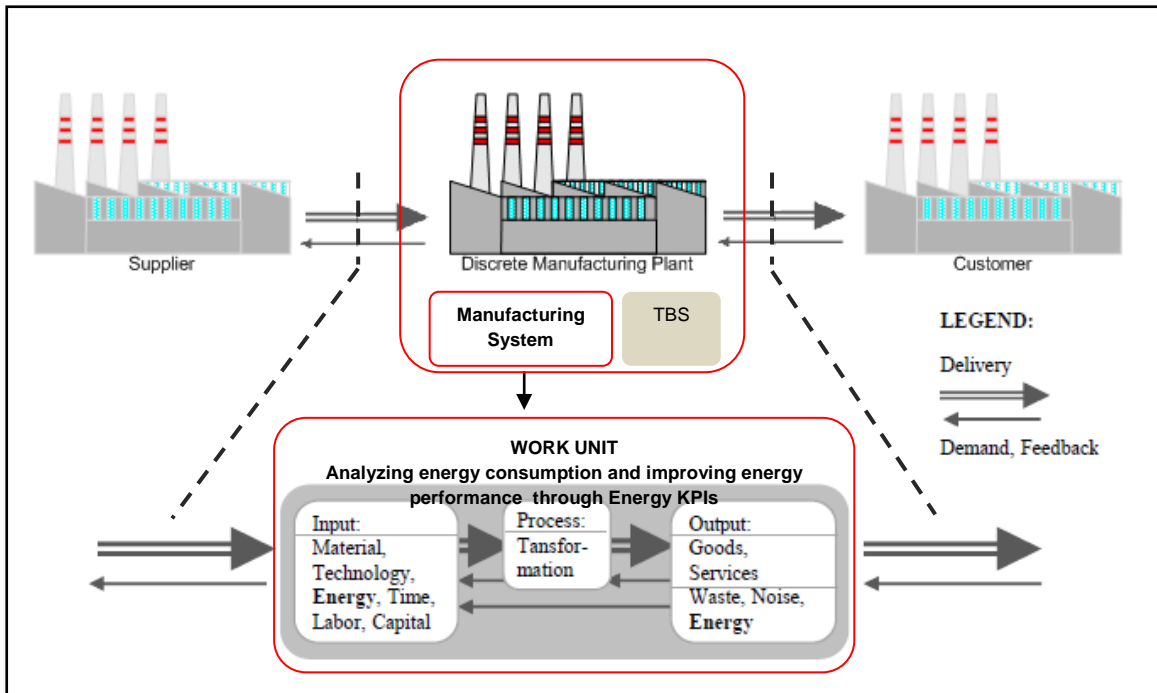


Figura 1.11: Confini e obiettivi di lavoro. Rielaborato da “Enhancement of current ICT solutions in production”.  
Fonte: Schönsleben 2007, Bunse and Vodicka 2011.

### 1.2.1: Confini del lavoro

Una prima limitazione che viene posta ai confini del lavoro (anche definiti come *scope*) è la considerazione degli elementi *energy-consuming*<sup>8</sup> ai quali la misura, l'analisi e il miglioramento dell'EE si rivolge per questa trattazione.

In particolare, all'interno del Manufacturing (nel senso più generico possibile di “ambiente di produzione”), esistono due componenti *energy-consuming* complementari di natura e caratteristiche diverse: il *manufacturing system* (MS) - ovvero l'insieme di impianti di produzione, detti anche tecnologici- e gli impianti di servizio, detti anche ausiliari o anche *Technical Building Services* (TBS).

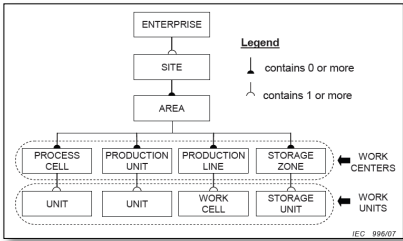

La differenza tra le due componenti risiede nella natura della loro partecipazione alla realizzazione dell'output produttivo o di servizio:

- nel MS “vengono compiute le attività di trasformazione vera e propria delle materie prime in prodotto finito (processo produttivo), ovvero quelle in cui si realizza il ciclo tecnologico”;
- i TBS “realizzano un ciclo compiuto di trattamento di un servizio attraverso una serie di macchinari e attrezzature” (Calabrese, 2004).

La tabella 1.1 illustra esempi di elementi che compongono il MS e i TBS in uno stabilimento produttivo.

<sup>8</sup> E' chiaro che l'entità del consumo energetico delle componenti può variare notevolmente in funzione del settore specifico all'interno del discrete Manufacturing, ovvero in funzione processi realizzati (una fresatura richiede un moderato dispendio energetico, al contrario di un processo di saldatura).

Tabella 1.1: Componenti *energy-consuming* di un impianto di produzione discreta e selezione della componente *in scope* della trattazione.

<b>MANUFACTURING</b>	
<b>MANUFACTURING SYSTEM</b>	<b>TBS</b>
<p>L'intero sito produttivo (site) o parti di esso (<i>area, work centers, work unit</i>), classificati secondo lo standard ISA-95.</p>  <p>Esempi di risorse produttive del MF:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ un centro di lavoro CNC;</li> <li>○ un tornio;</li> <li>○ un Flexible Manufacturing System (FMS);</li> <li>○ una conveyor;</li> <li>○ un Flexible Manufacturing Line (FML).</li> </ul>	<p>Impianti o sottoinsiemi di impianti di servizio.</p>  <p>Esempi di TBS:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ impianto elettrico;</li> <li>○ impianto idrico (acqua industriale, acqua sanitaria, acque reflue...);</li> <li>○ impianto termico (acqua calda, vapore...);</li> <li>○ impianto oleodinamico e pneumatico;</li> <li>○ impianti per lo stoccaggio dei materiali (serbatoi, magazzini e depositi);</li> <li>○ impianti per l'igiene e la sicurezza negli ambienti di lavoro (illuminazione, condizionamento, ventilazione, aspirazione inquinanti, antincendio, ecc.).</li> </ul>

In questa trattazione verrà preso in analisi solo il MS, mentre i TBS sono *out of scope* (in grigio in tabella 1.1). Questa selezione effettuata all'interno dei componenti energy consuming del sito produttivo trova sua giustificazione in un'esigenza di "circoscrizione" dell'entità del lavoro: un lavoro di ricerca orientato a sviluppare una metodologia di analisi e miglioramento delle performance di EE tramite KPI e sistemi di misura delle performance richiederebbe -per i TBS- un background di ricerca e una *knowledge* nettamente differente, nonché estremamente ampia, (sempre in riferimento a quella richiesta per il MS), in virtù dei flussi di materiali e di energia dei TBS, dei differenti ed eterogenei tipi di impianto, dei processi realizzati, delle entità servite.

Posta la considerazione dello *scope* appena illustrato, questa trattazione prevede in generale una definizione dei confini veri e propri del lavoro per step successivi, in maniera incrementale. Partendo dall'esplorazione dell'intera area coinvolta

all'interno del research focus, il campo di azione viene ristretto nel corso della trattazione man mano che si arriva all'illustrazione della metodologia proposta.

La Figura 1.12 mostra il processo incrementale di circoscrizione dello *scope* di ricerca, successivamente illustrato. In particolare si può notare la distinzione di due *scope*: il primo è uno *scope* di partenza, all'interno del quale si effettua l'investigazione della letteratura inerente il research topic. Il secondo, sottoinsieme del primo, è invece lo *scope* all'interno del quale viene sviluppata la metodologia. Le informazioni apportate dalla gap analysis e il supporto fornito da un PMS di efficienza energetica consentono di "restringere" lo *scope* all'interno del quale si sviluppa la metodologia.

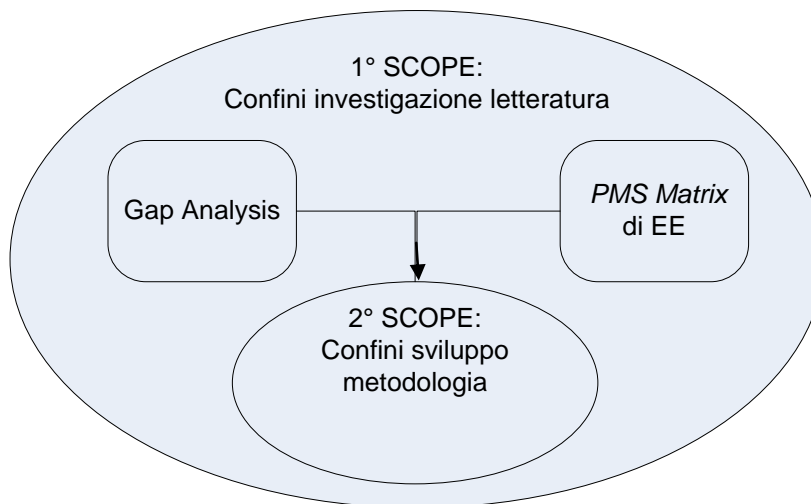


Figura 1.12: *Scope* della trattazione: *scope* in letteratura e sottoinsieme dello *scope* di metodologia.

In una prima analisi, lo *scope* di investigazione nella letteratura riguarderà l'intera letteratura (o perlomeno una buona parte, omnicomprensiva) inerente al research focus formulato. Il dominio di investigazione è notevolmente ampio: nella *Revisione bibliografica* (capitolo 2) si classificherà lo stato dell'arte dei KPI di EE secondo una serie di dimensioni di classificazione e attributi. Gli indicatori revisionati sono rivolti ad applicazioni che vanno dal livello settoriale e nazionale a livello di singola macchina e singolo processo. Inoltre, gli indicatori revisionati sono di diversa natura, da quelli che riguardano l'efficienza energetica dal punto di vista strettamente ingegneristico (termodinamici e fisico-termodinamici) a quelli di natura economica o ambientale di eco-efficiency. Si indaga inoltre sui differenti *issue* inerenti ai KPI e ai sistemi all'interno dei quali essi sono gestiti, quali la misura, il monitoraggio, l'analisi e la valutazione delle performance.

La gap analysis conclusiva della revisione bibliografica (capitolo 2) individua una serie di gap di ricerca, confrontando lo stato dell'arte e le pratiche adottate in letteratura con le esigenze industriali.

Alla fine del supportare il processo di individuazione dell'area all'interno della quale la metodologia di formulazione degli Energy KPI avrà luogo, è stato formulato un PMS di EE strutturato secondo una struttura matriciale (RO1), sviluppato nel capitolo 4. Lo scope metodologico viene formulato circoscrivendo all'interno del PMS un'area specifica di sviluppo: le informazioni apportate dalla gap analysis motivano la scelta effettuata.

Alla fine di questo processo si formulerà uno scope di sviluppo della metodologia proposta analizzando il manufacturing system secondo un dominio ristretto al livello *stabilimento*. La gestione del sistema produttivo a livello stabilimento verrà relazionata alle performance di consumo energetico della *singola stazione di lavoro*: nel caso dell'industry del discrete Manufacturing e in particolare dell'automotive, una macchina utensile o centro di lavoro, sulla base di quanto circoscritto nel PMS Matrix.

Questa metodologia di ricerca consente di limitare quanto più possibile la formulazione di assunzioni riguardanti scope di ricerca che potrebbero essere arbitrarie e non correttamente giustificate da esigenze di un maggior contributo da apportare. La metodologia di ricerca adottata è stata trattata in maniera esaustiva in sezione 3.2: *Research Methodology*.

### 1.2.2: Obiettivi del lavoro

In conclusione, ci si propone di sviluppare una metodologia strutturata per la misura, l'analisi e miglioramento delle performance energy-related delle aziende del *discrete Manufacturing* attraverso la progettazione e l'utilizzo di un sistema innovativo di Energy KPI, secondo un approccio orientato a supportare le aziende manifatturiere nel decision making dell'Energy Management.

L'obiettivo del lavoro andrà successivamente rifinito nel capitolo 3 di *Research framework e Research Methodology*, grazie alle informazioni apportate dalla gap analysis che indirizzeranno l'obiettivo del lavoro formulato in questo paragrafo in una direzione più precisa e definita attraverso Research Question e relative Research Objective.

Nel capitolo 4 verranno illustrate una serie di linee guida finalizzate a supportare le aziende manifatturiere nei processi di comprensione e selezione dei KPI di EE da misurare e monitorare. Un framework di sistema di misura delle performance rappresenta olisticamente, secondo una struttura matriciale, la collocazione delle metriche/KPI di EE all'interno di specifiche "celle".

Sulla base di quanto precedentemente illustrato all'interno del paragrafo 1.2.1: *Confini di lavoro*, si circoscrive l'area all'interno del quale la metodologia

verrà sviluppata, al fine di apportare un contributo al modo in cui le performance energy-related vengono analizzate e migliorate dalle aziende manifatturiere.

La metodologia genera Energy KPI in qualità di *decision support tool*, dal momento che essi sono progettati per abilitare la visualizzazione, l'analisi critica e il miglioramento delle performance energy-related (direttamente, di consumo energetico, e indirettamente di EE) attraverso dati e informazioni raccolte dal monitoring a livello shop floor e da sistemi MES , SCADA, CMMS, ERP. Il contenuto informativo degli indicatori indirizza l'assegnazione delle priorità di intervento nei confronti di definiti "cluster di responsabilità aziendale" del sistema manifatturiero considerato.

La metodologia nel suo complesso, progettata secondo un loop di *continuous improvement*, contribuisce in maniera attiva a supportare il decision making dell'EM all'interno delle produzioni discrete.

### **1.3: Benefici e barriere all'efficienza energetica nelle organizzazioni**

#### **1.3.1: Benefici di miglioramento dell'EE nelle organizzazioni**

Sono molti benefici conseguibili dall'aumento dell'EE: essi possono essere suddivisi in finanziari/economici, ambientali e sociali (in relazione alla triple bottom line della sostenibilità).

Molti dei benefici che verranno elencati sono ovviamente dirette conseguenze dei driver di ricerca dell'EEM appena riportati nella sezione precedente, come si avrà modo di vedere. Si aggiunge inoltre che il vantaggio concreto di ciascuno di questi benefici dipende dalla reale situazione dell'area o Paese, considerando i prezzi dei differenti tipi di energia, il costo delle misure di EE, il regime delle tasse e il livello di EE dello status quo (UNIDO, 2010).

Per le aziende private, il più importante beneficio conseguibile dall'EE è quello in termini finanziari, connesso ai costi più bassi per portare avanti le proprie attività. Gli stakeholder non sono ben consapevoli del fatto che, in parecchi business, lo stadio iniziale di aumento dell'EE può essere raggiunto attraverso investimenti in capitale di entità piccola e addirittura nulla: un esempio può essere l'esecuzione di manutenzioni corrette e tempestive, che possono avere un sostanziale effetto sul miglioramento dell'EE (rimpiazzare un isolante rotto o inadeguato in una tubazione calda o fredda), oppure assicurare le giuste condizioni di combustione per forni e caldaie. Investimenti di entità più elevata, come ad esempio nuovi impianti o nuove caldaie, sono spesso giustificati economicamente (UNIDO, 2010).

In linea più generale è possibile affermare che aziende efficienti possono guadagnare un vantaggio competitivo rispetto a quelle meno efficienti, consentendole di aumentare i loro profitti a parti prezzi dei prodotti, o abbassare i

loro prezzi per guadagnare quota di mercato, o una combinazione di queste cose.

Inoltre il ridotto impatto ambientale può essere concepito come uno strumento significativo di marketing, dato che nelle decisioni di acquisto la percezione di comprare da un'azienda "green" sta acquisendo un ruolo crescente. I benefici ambientali includono molti elementi tra i quali la riduzione dell'inquinamento locale bruciando minor combustibile, più basse emissioni di gas ad effetto serra. Anche laddove l'output delle aziende aumenti (ad esempio attraverso una maggior capacità produttiva) i miglioramenti dell'EE possono contribuire significativamente in molti casi a ridurre l'impatto negativo del consumo energetico per unità di output. Qualsiasi aumento delle emissioni di inquinamenti sarebbe così minimizzato.

E' stato osservato come gli investimenti di EE possano essere incoraggiati attraverso varie forme di tassazione. Molte di queste sono orientate ad un deprezzamento per certe categorie di impianti o processi efficienti; in alcuni Paesi inoltre consumi di energia più bassi possono condurre ad una riduzione degli oneri fiscali (UNIDO, 2006).

### **1.3.2: Barriere al miglioramento dell'EE nelle organizzazioni**

A dispetto del fatto che l'EE sia stata studiata come azione "di buon senso" in molte situazioni –sia in termini di risparmi di costo che riduzione dell'impatto ambientale- è spesso difficoltosa una sua effettiva comprensione, e soprattutto una sua messa in pratica da parte dei manager delle aziende nonché dai singoli individui.

Nonostante le motivazioni e gli incentivi che le aziende industriali avrebbero ad un miglioramento dell'EEM esiste il fenomeno dell' "energy efficiency gap" - ampiamente discusso- che descrive come investimenti potenzialmente profittevoli nell'EE siano ben lontani dall'essere esplorati (DeCanio S. , 1993), (Eichhammer W. , 2004), (IEA, 2008b). Normalmente gli stakeholder sono inclini ad accettare quasi sempre lo status quo, che solitamente è uno scenario meno efficiente, e si rivelano motivati a rispondere ad iniziative di EE solo quando si percepisce una situazione di crisi, ad esempio insufficienti forniture di energia. Inoltre, per quanto riguarda le aziende private, spesso si dà la precedenza ad altre priorità come l'aumento della capacità produttiva e la quota di mercato, svuotando quindi qualsiasi riserva per la spesa in EE (UNIDO, 2010). L'energy efficiency gap risiede dunque nell'esistenza di alcune barriere all'implementazione delle misure di miglioramento dell'EE che un certo numero di paper accademici ha precedentemente esaminato, ad esempio decisioni basate sul payback time anziché il calcolo dei tassi di interesse, capitale disponibile limitato, una bassa priorità che il management riserva all'efficienza energetica (Eichhammer W. ,

2004), mancanza di informazione (Sardianou, 2008), la “difficoltà a misurare le componenti” degli investimenti in energia (per esempio i costi di transazione o di monitoraggio) (DeCanio S. W., 1998). Diversi studi hanno anche identificato come barriera all’efficienza energetica una bassa considerazione o priorità attribuita all’energy management (SPRU, 2000.), (Rohdin and Thollander, 2006).

Secondo Phylipsen (2010), e come già accennato nella sezione precedente, il settore pubblico gioca un ruolo fondamentale nel promuovere l’EE e abbassare le relative barriere. Esiste a tal proposito un’ampia gamma di strumenti, come ad esempio gli standard, normative, incentivi finanziari (sussidi, tasse, incentivi, accesso al credito facilitato), strumenti market-based come il prezzo dell’energia, la compravendita di certificati *green*, R&D, strumenti che aumentino la consapevolezza degli attori che giocano un ruolo principale in questo scenario, allineando così gli obiettivi macroeconomici a quelli societari.



## 1.4 Struttura della trattazione

La Figura 1.13 riporta la successione delle fasi (ovvero dei capitoli) su cui si articola la trattazione. Ciascuna fase viene dettagliata con una keyword di riferimento oppure eventualmente con le RQ e RO ad esse relative.

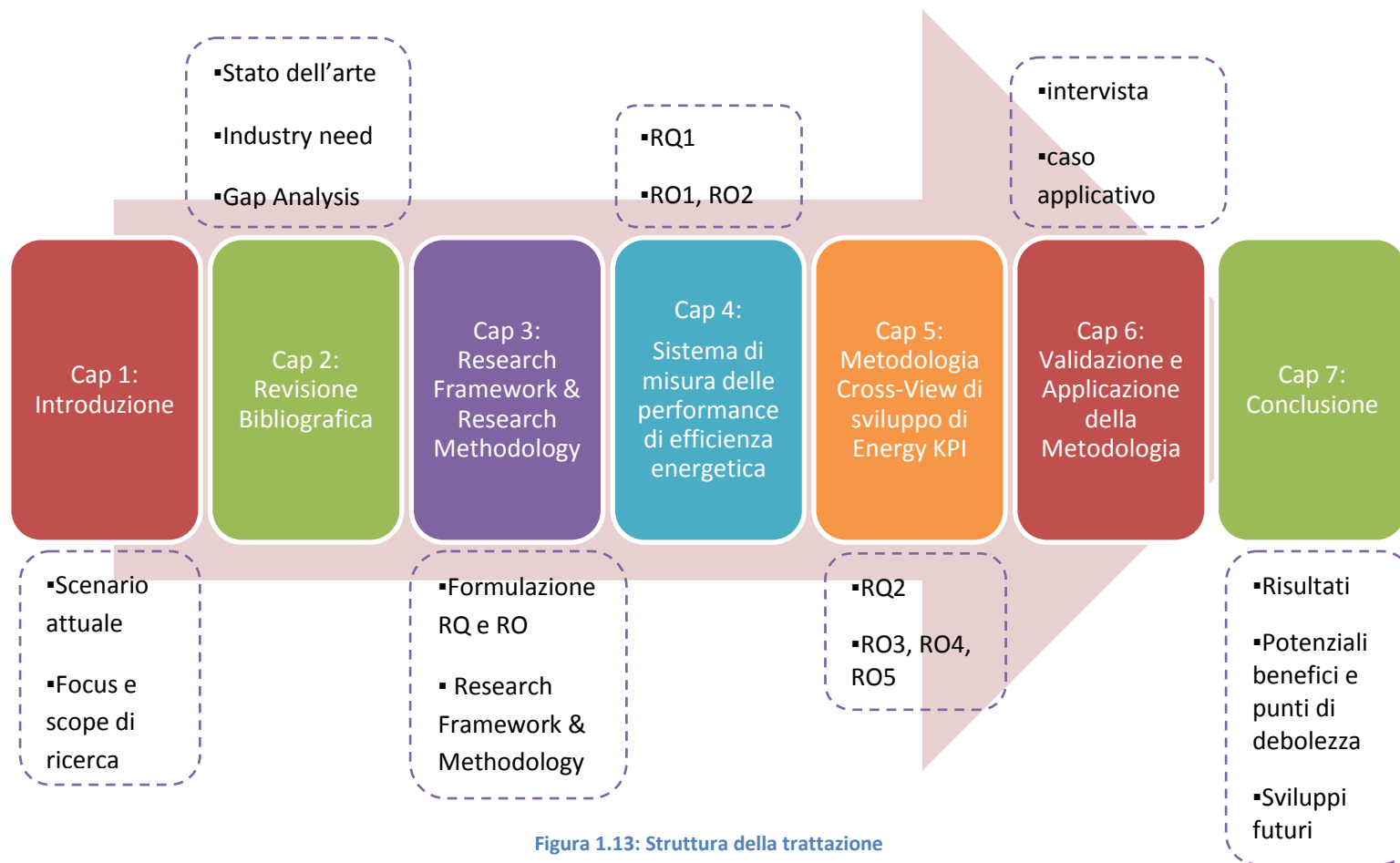


Figura 1.13: Struttura della trattazione

## Capitolo 2 : REVISIONE BIBLIOGRAFICA

La revisione bibliografica condotta in questo capitolo è effettuata in funzione del focus di ricerca precedentemente definito come “KPI energy-related e sistemi di misura delle performance in qualità di decision support tool nell’EM”.

Il capitolo si suddivide in quattro sezioni: 2.1 *Background teorico*, 2.2: *Key Performance Indicator di efficienza energetica*, 2.3: *Monitoraggio, misurazione, analisi e valutazione delle performance di efficienza energetica* e 2.4: *Gap Analysis*.

La Figura 2.1 mostra nel suo complesso l’approccio con il quale è stata condotta la revisione bibliografica. La prima sezione, che rappresenta le fondamenta della figura, pone le basi logiche e teoriche per poter comprendere le due sezioni successive, orientate alla trattazione vera e propria. Il “GAP” in figura costituisce l’output conclusivo della revisione bibliografica che, sulla base delle informazioni ricavate dalla letteratura e dalle esigenze emergenti, mette in luce uno o più gap di ricerca che la trattazione si propone di colmare.

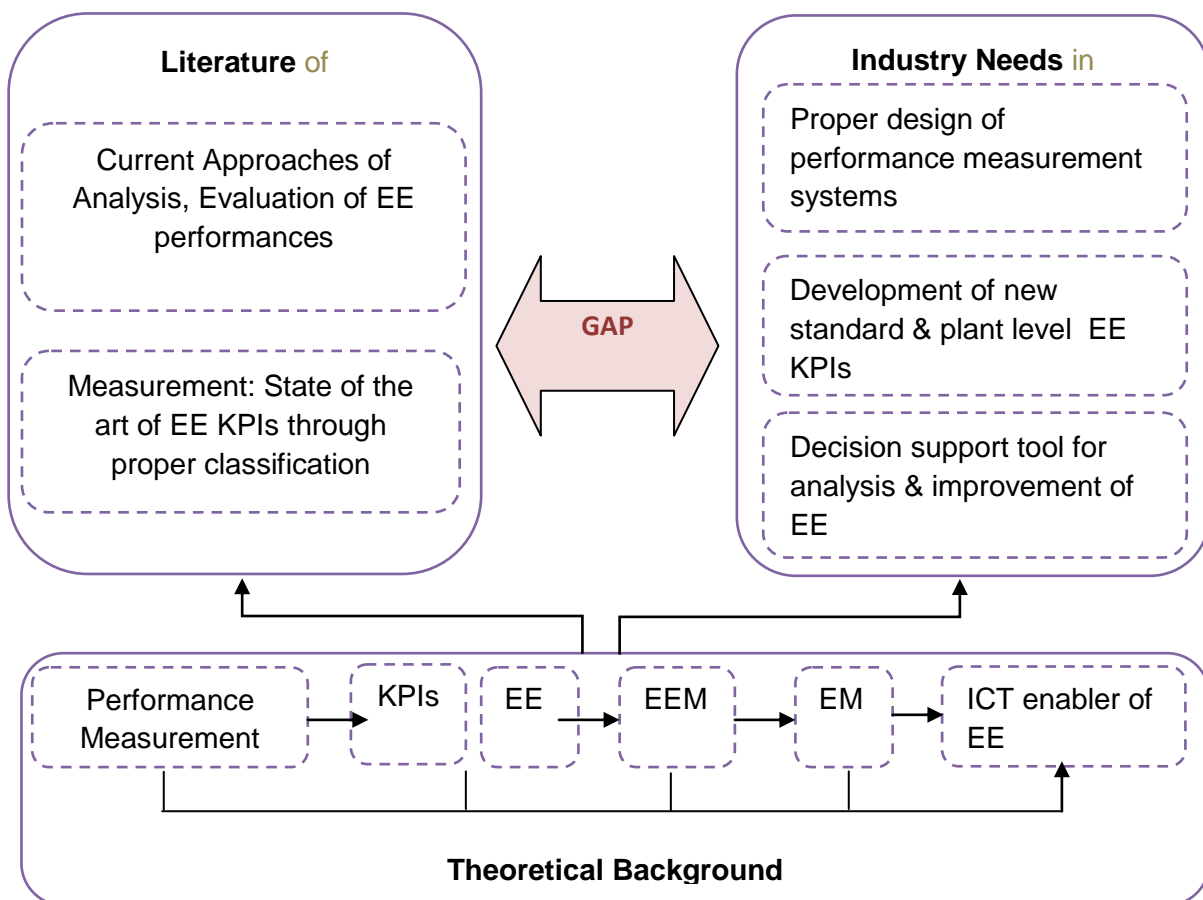


Figura 2.1: Framework di sviluppo del research gap.

## 2.1: Background teorico

Per poter procedere con l'analisi della letteratura dei KPI di EE e delle esigenze del Manufacturing ad essi relativi occorre in primis definire e approfondire gli teorici principali di:

- Misurazione delle performance;
- KPI;
- Efficienza energetica;
- Efficienza energetica nel manufacturing;
- Energy management;
- ICT come supporto all'EE.

Oltretutto, la conoscenza di questi aspetti fornisce non solo un supporto nella determinazione dello stato attuale che la letteratura riporta, ma anche delle esigenze correnti che l'industry del Manufacturing indirizza a questo tipo di tematiche (come mostra la Figura 2.1).

In particolare, si riporta brevemente sotto quale prospettiva queste tematiche sono state analizzate nel background teorico:

- la problematica della misurazione delle performance di EE si inserisce all'interno di una tematica più estesa, che è quella della misurazione delle performance nella sua globalità. Nel paragrafo dedicato verranno esplorate una serie di definizioni relative al topic della misurazione delle performance;
- per i topic "KPI" ed "Efficienza energetica" verranno esplorate una serie di definizioni emesse dagli studiosi più autorevoli e maggiormente adottate in letteratura, per poi selezionare la definizione di riferimento adottata nella trattazione all'interno di un box, secondo un criterio di maggiore accuratezza della definizione e/o allineamento all'obiettivo della trattazione. Verranno successivamente descritti aspetti quali obiettivi, modalità di utilizzo, ecc;
- per il topic "Efficienza energetica nel manufacturing" ed "Energy management" si mettono in luce aspetti descrittivi principali e le aree di copertura della metodologia all'interno di questi topic, in termini di leve/approcci/obiettivi considerati;
- infine il topic "ICT come supporto all'EE" viene introdotto in modo tale da rendere esplicito il link tra KPI di EE e ICT, nel quale l'ICT assume un ruolo abilitante all'EE. In particolare, in riferimento al ruolo abilitante che l'ICT riveste nello specifico per i KPI di EE, aspetti dell'ICT quali "monitoring" e "measurement" meritano un'analisi in dettaglio.

### 2.1.1: Misurazione delle performance

In letteratura esistono una serie di definizioni collegate con il concetto di misurazione delle performance.

Secondo Neely, Mills, Gregory, & Platts (1995) la misurazione delle performance è “un argomento spesso discusso ma raramente definito”, ragion per cui gli autori hanno apportato maggior chiarezza su questa tematica distinguendo tra una serie di terminologie quali *Performance Measurement* (misurazione delle performance, che verrà indicata con l’acronimo PM), *Performance Measure* (misura delle performance), *Performance Measurement System* (PMS). E’ importante dunque avere bene in mente la differenza esistente tra i tre termini, che si riferiscono a tre concetti differenti per i quali sono disponibili in letteratura una serie di definizioni. In Tabella 2.1 viene associato a ciascun topic la definizione corrispondente, in modo da rendere ben visibile la differenza tra i tre topic.

Tabella 2.1: Definizioni associate alle tre terminologie riguardanti la misura delle performance.

Performance “MeasureX”	Definizione
Performance Measure	Metrica utilizzata per quantificare l’efficienza e/o l’efficacia di un azione (Bourne, Mills, Wilcox, Neely, & Platts, 2000).
Performance Measurement	Processo di quantificazione dell’efficacia e dell’efficienza dell’azione dove l’efficacia è considerata una competenza per raggiungere la soddisfazione del consumatore e l’efficienza consiste nel miglior utilizzo delle risorse dell’impresa Neely, Gregory, & Platts (1995).
Performance Measurement System	Mezzo per raccogliere dati al fine di supportare e coordinare i processi, prendere decisioni e implementare azioni all’interno dell’organizzazione J.C. Schankwyk (1998), per il quale esiste un approccio strutturato di sviluppo e implementazione applicato al set di metriche in uso.

Attraverso una serie di definizioni esplorate, e sulla base da quanto è emerso nei paper citati precedentemente, si conclude che la differenza tra un PMS e la definizione precedente risiede nel fatto che la misurazione delle performance è implementata attraverso *strumenti* che abilitino la misurazione delle performance stesse attraverso un set di metriche, mentre un PMS richiede per il suo sviluppo e la sua implementazione un approccio strutturato che sia applicato al set di misura in uso e che viene riassunto da Bourne et al. (2000) nei seguenti punti:

1. il PMS deve includere un meccanismo efficace che consenta di rivedere e revisionare i target e gli standard (Ghalayini & Noble, 1996);
2. il PMS deve includere un processo che consenta di sviluppare le singole misure che quantifichino i cambiamenti delle performance e delle condizioni (Dixon, Nanni, & Vollmann, 1990),(McMann & Nanni, 1994);

3. il PMS deve includere un processo che consenta periodicamente di rivedere e revisionare il set completo di misure in uso: questo processo avviene in corrispondenza dei cambiamenti presenti nell'ambiente competitivo o nelle linee strategiche. (Wisner & Fawcett, 1991), (Dixon, Nanni, & Vollmann, 1990) (Lingle & Schiemann, 1996);
4. il PMS deve essere usato per sfidare e mettere in dubbio le assunzioni strategiche (Bourne et al., 2000).

Artley, Ellison e Kennedy (2001) legano la misurazione delle performance con la gestione delle stesse nel modello *performance-based management*. Esso consiste in un approccio sistematico per migliorare le prestazioni attraverso un processo di definizione degli obiettivi di performance strategici, misurazione, raccolta, analisi e reporting. Il performance-based management segue il ciclo Plan- Do-Check-Act (*Continuous Improvement*).

Secondo gli autori la misurazione delle performance è una componente critica del modello. Attraverso l'analisi dello stesso si comprende come le organizzazioni gestiscano le performance attraverso la loro misurazione, come rappresentato nella Figura 2.2.

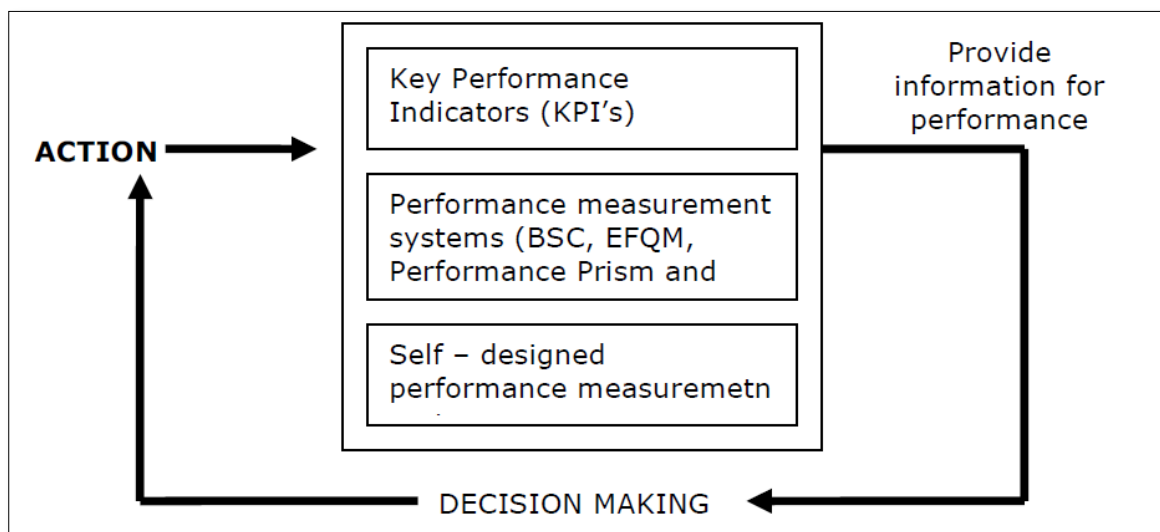


Figura 2.2: Relazione tra misurazione delle performance e gestione delle performance. Fonte: Slizyte & Bakanauskiene, 2007.

E' chiaro dunque che i KPI, trattati ampiamente nel paragrafo successivo, costituiscono le fondamenta e lo strumento basilare per poter costruire un sistema di misura delle performance orientato al miglioramento continuo e improntato sul decision making.

### 2.1.2: Key Performance Indicator

Gli indicatori di performance sono stati per lungo tempo oggetto di ricerca sia nel mondo accademico che in quello delle aziende, ragion per cui esistono in letteratura una serie di definizioni attribuite ai Key Performance Indicators.

Innanzitutto, Morvay e Gvozdenac (2008) definiscono la *performance* come la capacità di portare a termine un compito o un'operazione in accordo ad uno specifico standard, dove lo standard può essere definito in termini di misure, criteri di valutazione o benchmark al fine di valutare gli scostamenti tra la performance effettiva e quella prestabilita, come base per il controllo manageriale.

Peter Drucker affermava: "*what gets measured, gets managed*", e Lebas (1995) ha evidenziato infatti l'importanza del legame esistente tra la misura delle prestazioni e la gestione delle prestazioni, definendo la performance come il *potenziale* per il futuro successo dell'implementazione delle azioni mirate al raggiungimento degli obiettivi e dei target.

Ahmad and Dhafr (2002) definiscono un KPI come un numero o un valore che può essere confrontato con un target interno o esterno (ovvero un benchmark), con lo scopo di fornire un'indicazione della performance.

L'impatto positivo dell'utilizzo dei KPI come linee guida delle operations e attività delle aziende è stato evidenziato in numerose ricerche (Hon, 2005), (Najmi, Rigas, & Fan., 2005) dal momento che essi sono in grado di quantificare le inefficienze e supportare l'identificazione di quelle aree che necessitano di maggiori sforzi di miglioramento.

La definizione di KPI di riferimento per questo lavoro definisce un KPI come "una misura quantificabile che riflette le performance di un'organizzazione nel raggiungimento dei propri obiettivi" (Bauer, 2004).

Come afferma Bauer (2004), il KPI deve essere in grado di misurare lo "stato di salute" di un'impresa e assicurare che tutti gli individui e i differenti livelli al suo interno stiano "marciando" verso gli stessi obiettivi e la stessa strategia, e sono il punto cardine per una standardizzazione, collaborazione e cooperazione diffusa in tutta l'impresa. Nella letteratura si trova più volte il concetto espresso da Drucker parafrasato in maniere diverse; ad ogni modo, poiché "si gestisce ciò che si misura e quello che non si misura merita poca attenzione o nessuna" ne consegue che il successo di un programma di gestione delle performance risulta contingente alla selezione dei KPI corretti e adatti agli scopi dell'organizzazione. E' dunque fondamentale che i KPI misurino quei pochi e vitali processi e attività che riflettano lo stato di salute dell'organizzazione, e che siano limitati ai soli fattori che sono essenziali per l'organizzazione al raggiungimento degli obiettivi:

la scelta di un KPI non appropriato può dar vita a comportamenti controproducenti e sub ottimizzare i risultati, (Bauer, 2004), dal momento che gli indicatori possono essere selezionati e monitorati da differenti stakeholder per scopi diversi. I KPI, poiché quantificano un'informazione o un fenomeno, sono uno strumento per facilitare i processi di decision making da parte degli stakeholder di riferimento responsabili delle attività e dei processi monitorati.

Gli indicatori possono essere sia quantificabili (quantitativi) che non quantificabili (qualitativi): all'interno di un sistema di misura è auspicabile la presenza di entrambe le tipologie (Diakaki C., 2006). Per quanto concerne gli indicatori quantitativi esistono cinque tipologie di espressione: gli indicatori assoluti, relativi, aggregati, indicizzati e pesati (ISO14.031, 1998). Gli indicatori aggregati e indicizzati integrano dati all'interno di categorie particolari o in un numero che rappresenta il livello della performance. Questo tipo di indicatori si rivela particolarmente utile nella valutazione complessiva delle performance di un'impresa, tuttavia la relativa mancanza di informazioni dettagliate ne limita l'utilizzo pratico in termini di opportunità di ottimizzazione delle performance, dove –a tal proposito- è invece raccomandato l'utilizzo di indicatori assoluti e relativi, esprimibili sia in unità fisiche (ad esempio litri, o tonnellate) sia in unità monetarie. In particolare, gli indicatori relativi sono particolarmente adatti per quanto concerne il decision making, in quanto consentono di osservare in maniera diretta i cambiamenti di valori particolari (ad esempio l'inquinamento) in relazione ad un comun denominatore (ad esempio materia prima o unità produttive), (Staniškis & Arbačiauskas, 2009).

Per quanto concerne i criteri con i quali gli indicatori dovrebbero essere sviluppati (e che di conseguenza rendono ben distinti i KPI da una semplice “metrica” o “misura”), essi sono riassunti nel ben noto SMART (Specific, Measurable, Attainable, Realistic and Time-sensitive) (Doran, 1981) più volte richiamato nella letteratura di progettazione/selezione dei KPI.

Gli indicatori devono essere articolati in *dimensioni*, che sono necessarie per poter discernere gli indicatori da dati primari<sup>9</sup>, parametri, obiettivi o tematiche. (Veleva & Ellenbecker, 2001). Veleva e Ellenbecker (2001) a tal proposito forniscono due utili esempi. “Sicurezza” non è un indicatore, è una tematica, e possibili indicatori per il tema “sicurezza” possono essere “numero di incidenti” e “percentuale di dipendenti che hanno ricevuto un training sulla sicurezza”. Allo stesso modo “utilizzo di energia rinnovabile” non può essere considerato come indicatore: un possibile indicatore che rifletta l'utilizzo di energia rinnovabile può

---

<sup>9</sup> I dati primari rappresentano dati raccolti sul campo mediante indagini statistiche ad hoc, ovvero svolte appositamente per il problema sotto analisi. La ricerca sul campo può essere di due tipologie: le rilevazioni e le ricerche sperimentali. Fonte: “L'azienda, i dati, le informazioni, la statistica”, web, [http://www.economia.unical.it/statistica/didattica/Metodi%20statistici%20per%20le%20Aziende%20/04\\_05/Le%20indagini%20%20amministrative.pdf](http://www.economia.unical.it/statistica/didattica/Metodi%20statistici%20per%20le%20Aziende%20/04_05/Le%20indagini%20%20amministrative.pdf).

essere “percentuale di energia proveniente da rinnovabili, misurata all’interno di un impianto su un periodo di un anno”.

Al fine di promuovere una miglior comprensione degli indicatori il Lowell Center for Sustainable Production (LCSP, 1998) ha identificato quattro dimensioni chiave:

- l’unità di misura - euro, tonnellate, kilogrammi, ore, percentuale-;
- il tipo di misura –assoluta (ad esempio energia totale utilizzata nell’anno in kWh) o relativa (energia utilizzata per unità di prodotto/servizio nell’anno-;
- periodo di misura –il periodo di rilevazione e calcolo dell’indicatore (esercizio contabile, anno solare, semestre, trimestre, mese)-;
- limiti –che circoscrivono i confini della misura (linea di prodotto, stabilimento, l’intero ciclo di vita di un prodotto)-.

Queste tuttavia non costituiscono le uniche dimensioni possibili. In letteratura si trovano altri suggerimenti per poter dettagliare un KPI: come afferma Chrissolouris (2006), è chiaro che ciascun indicatore dipende da particolari “objectives, goals, and criteria”, dove per “objective” l’autore intende un attributo da massimizzare o minimizzare, mentre “goal” è il valore target o il range di valori per un attributo, e il “criterion” è un attributo che è valutato durante il processo di decision making. Anche Bauer (2004) suggerisce, oltre alle dimensioni riconducibili a quelle fornite dal LCSP, altre indicazioni espresse sotto forma di domanda, ad esempio:

- quanto spesso dovrebbe essere effettuata la misura?
- chi è responsabile del valore della misura?
- quale misura può essere utilizzata come benchmark?

Lo standard ISO 22400 risulta estremamente utile in tal proposito, in quanto fornisce una definizione chiara e univoca dei KPI usati a livello Manufacturing Operations Management<sup>10</sup> (MOM). Lo standard specifica la struttura “tipo” della registrazione dei KPI attraverso una serie di attributi, come mostra la tabella 2.2.

---

<sup>10</sup> Il Manufacturing Operation Management è definito dal IEC 62264-1 e corrisponde al Livello 3 dello standard ISA-95 (si veda l’allegato 5 in Appendice B). Esso comprende attività all’interno di uno stabilimento di produzione che coordinano il personale, gli impianti e il materiale, suddivise in quattro categorie: production operations management, maintenance operations management, quality operations management e inventory operations management.



Tabella 2.2: “KPI structure”. Fonte: ISO/DIS 22400-2, 2011.

Name / Title of indicator:	
ID <sup>a</sup>	
Description	
Application:	
Timing	
Definition and calculation	
Formula:	
Unit / Dimension:	
Rating:	
Analysis / Drill down:	
Remarks	
Notes / Explanation:	
User group:	
Effect model	
Manufacturing type:	
<sup>a</sup> ID is not used in this part of ISO 22400, whose scope does not include KPI implementation and exchange of KPIs.	

Si riportano brevemente le descrizioni degli attributi più rilevanti indicati in tabella, tralasciando quella relativa ad attributi ovvi come l'identificativo (ID) dell'indicatore, la formula di calcolo, l'unità di misura, ecc.

Per “Application” si intende una breve descrizione del beneficio apportato dal KPI, incluso il suo utilizzo e se conseguenze nelle applicazioni.

Per “Timing” si intende la frequenza di calcolo, che può essere in tempo reale, o sulla base di una specifica richiesta di selezione dei dati, o periodica (ad esempio una volta al giorno).

Il “Rating” costituisce i limiti logici inferiori e superiori del KPI e il trend che ne indica il miglioramento.

L' “Analysis / Drill down” contiene la descrizione dei relativi elementi che servono ad effettuare le operazioni di drill down<sup>11</sup> e analisi delle cause primarie dei risultati dei KPI: ad esempio, nel caso dell'indicatore Overall Equipment Effectiveness (OEE) si deve analizzare il tasso di qualità. Il drill down mostra un indicatore diretto che si riferisca alla postazione di lavoro, al prodotto e al periodo temporale. Questa costituisce un'analisi veloce che supporta un miglioramento rapido di efficienza attraverso azioni correttive, riducendo oltretutto gli errori.

L' “User group” definisce il gruppo di utenza che utilizza il KPI.

<sup>11</sup> L'operazione di drill down fa riferimento all'esame “all'origine” dei dati utilizzati per calcolare l'indicatore di performance. Fonte: ISO 22400.

L'“Effect model” è un metodo di valutazione usato per trovare le cause primarie di un cambiamento del valore del KPI e come esso si relaziona agli altri elementi e agli altri KPI.

Il “Manufacturing type” si riferisce al tipo di produzione (continua, batch, discreta) per il quale il KPI deve essere usato.

Sebbene l'obiettivo a più alto valore aggiunto della trattazione riguardi lo sviluppo di una metodologia di progettazione di Energy KPI piuttosto che la proposta di un singolo cruscotto di indicatori specifico per uno o più casi di studio (come è stato effettuato in altre trattazioni), si potrebbe ad ogni modo pensare di utilizzare, ai fini del record e della visualizzazione dei KPI, un *record sheet* con alcune delle dimensioni e degli attributi selezionati tra quelli illustrati.

In questo paragrafo sono stati riportati significato e caratteristiche dei KPI a livello più generico possibile, nella sezione 2.2: *Key Performance Indicator di efficienza energetica*, che tratta lo stato dell'arte dei KPI di EE, verranno invece approfonditi aspetti e caratteristiche di questi KPI di natura più specifica.

### 2.1.3: Efficienza energetica

Come già affermato nel primo capitolo, l'efficienza energetica è uno degli *hot topic* principali dell'ultimo decennio: se ne parla all'interno della ricerca accademica, delle normative e policy nazionali e internazionali così come se ne parla in termini di benefici, competitività e immagine delle aziende. Ciononostante, “efficienza energetica” è un termine generico, e non esiste in letteratura una misura quantitativa che sia univocamente attribuibile all'EE. Sono reperibili differenti definizioni di EE, e differenti definizioni conducono a differenti indicatori che misurano i cambiamenti dell'EE e che quindi conducono a risultati e implicazioni differenti (Berndt, 1978), o addirittura contraddittori (IEA, 2008).

In particolare, in questo paragrafo, verranno analizzati “sub-topic” quali:

- Efficienza Energetica;
- Energy Intensity;
- Energy Saving, Rebound e Backfire Effect.

## Efficienza Energetica

Una delle definizioni più note in letteratura, è quella di Patterson (1996), secondo il quale l'Efficienza Energetica si riferisce all'utilizzo di minor energia per la produzione di una stessa quantità di servizi o di output utile.

Spesso l'Efficienza Energetica è definita in termini generici da un semplice rapporto:

$$EE = \frac{\text{Useful output of a process}}{\text{Energy input into a process}} \quad [\%] \quad (2.1)$$

Il problema sta nel definire quale sia l'output utile e quale sia l'energia in input, problema che da origine alle differenti considerazioni di EE (Patterson, 1996).

Herrmann e Thiede (2009) considerano l'EE come l'ottimizzazione del rapporto tra l'output produttivo e l'energia in input (elettricità, oil and gas) per servizi tecnici ed impianti di produzione.

Una definizione vicina a quella di Patterson è quella di Bunse, Sacks e Vodicka (2009), rappresentata nel box in quanto selezionata come definizione di EE per questo lavoro.

Bunse, Sacks e Vodicka (2009), che definiscono l'EE come la riduzione del consumo energetico a fronte della realizzazione di uno stesso compito.

Eichhammer (2004) ha inoltre svolto un lavoro molto dettagliato, fornendo fino a nove distinte definizioni di EE che vanno dall'area tecnica all'area macroeconomica.

L'IEA (2008) definisce l'EE l'come la realizzazione di più servizi dallo stesso input di energia o la realizzazione degli stessi servizi da un minor input di energia. Definizione che abbraccia sia la leva del consumo energetico che quella dell'output produttivo/di servizio è quella di Morvay e Gvozdenac (2008), che definiscono l'EE dall'ottenimento di maggiori servizi di energia finale da una minor energia.

La scelta della definizione di Bunse, Sacks e Vodicka (2009) trova sua giustificazione nella sezione 1.2: *Confini e obiettivi del lavoro*. In essa, la performance energetica che la metodologia mira ad analizzare e gestire è orientata allo studio delle variazioni del solo consumo energetico, esulando dunque uno studio di altri innumerevoli fattori che impattano potenzialmente sulla performance di EE nel suo complesso come fenomeni di ciclicità e stagionalità che condizionano l'input (e conseguentemente l'output) di produzione, cambiamenti settoriali, cambiamenti climatici<sup>12</sup>, ecc.

---

<sup>12</sup> Per i quali esistono KPI di EE (prevalentemente di tipo "Energy Intensity") e metodi di decomposizione dei fattori di contesto esterni che, per loro natura, utilizzano dati aggregati e si rivolgono ad un contesto "macro" esulando quindi dallo scope della trattazione.

Il panorama di definizioni esaminate rende inoltre l'idea di come l'EE possa essere ottenuta attraverso molteplici approcci: una riduzione degli sprechi di energia attraverso una serie di leve quali ad esempio tecnologie più efficienti, l'energy management, o best practice nelle operations. Queste tematiche verranno approfondite nel paragrafo 2.1.4: *Efficienza energetica nel manufacturing* a pag. 36.

### Energy Intensity

A livello nazionale non si parla tanto di EE quanto piuttosto di "Energy Intensity" (EI), indicatore che verrà approfondito nel paragrafo

2.2.2: Stato dell'arte dei *Key Performance Indicator* di , riguardante lo stato dell'arte dei KPI di EE a pag. 60. L'EI è definita dal seguente rapporto (Spalding-Fecher, 2003), (Ang, 2006):

$$EI = \frac{\text{Energy consumption}}{\text{Economic value}} \left[ \frac{J}{\text{€}} \right] \quad (2.2)$$

L'EI è ottenuta dall'energia utilizzata (ovvero dal consumo energetico) rapportata ad una misura rappresentativa del livello di attività o di output. Il denominatore può essere dunque il valore aggiunto o il GDP.

Nel caso di utilizzo del GDP<sup>13</sup>, il numeratore sarà costituito coerentemente dal consumo energetico a livello nazionale.

Confrontando la definizione di EE con la definizione di EI si può dunque dedurre come l'EE sia relazionata con l'inverso dell'EI (se cresce l'una, l'altra diminuisce e viceversa).

Il valore aggiunto è spesso considerato come un buon candidato all'interno degli indicatori poiché si suppone che rifletta il contributo delle attività del manufacturing al welfare globale, che ad esempio può essere misurato attraverso il GDP nazionale. Questa scelta non pone particolari problemi a livello macroeconomico, al contrario dell'utilizzo di tale misura a livello corporate, in relazione alle assunzioni, ai punti di vista, e in alcuni casi anche dal contesto (Huizing & Dekker, 1992).

<sup>13</sup> GDP sta per Gross Domestic Product, ovvero Prodotto Interno Lordo.

E' stato studiato come il rapporto tra l'energia utilizzata e il GDP dica molto poco sia sull'intensità che sull'efficienza (Schipper & Grubb, 2000), ragion per cui l'EI è spesso definita in letteratura come una misura approssimativa o "surrogato" dell'EE.

La motivazione principale risiede nel fatto che l'EI include tipicamente componenti strutturali e comportamentali: a causa delle unità di misura con il quale l'EI è costituito, cambiamenti nel settore, come ad esempio la turnazione per i prodotti realizzati, impatteranno sull'EI, indipendentemente dai cambiamenti dell'EE degli impianti processi e macchinari coinvolti (UNIDO, Energy efficiency technologies and benefits, 2010). Per questo e per altri motivi è opinione prevalente il fatto che ottenere una visione chiara dei miglioramenti dell'EE relativi all'impiego di policy di EE richieda l'utilizzo di indicatori in grado di filtrare l'influenza di cambiamenti strutturali, e che relazionino l'energia consumata ad output fisici (Ramirez, Blok, Neelis, & Patel, 2006).

Il fatto che, nonostante ciò, per le analisi effettuate ad alto livello di aggregazione venga utilizzato comunque il valore aggiunto o il GDP come misura di output è dovuto al ben noto problema di rappresentazione dell'output fatto attraverso un set ristretto e ben definito di prodotti per i quali sono noti i dati di consumo di energia e di output fisico (IEA, 2004).

Schipper e Grubb (2000) decidono di rappresentare l'EI ponendo al denominatore una misura che spieghi la quantità di attività o di output, come ad esempio lo spazio a pavimento riscaldato fino ad una certa temperatura. All'intensità viene dato il nome di *specific* o *unit consumption* (misurato quindi, ad esempio, come kWh/anno per un dato refrigeratore di una data dimensione e costruzione). L'EE è ad ogni modo relazionata con l'inverso dell'EI, ma la differenza reale tra i due tipi di indicatore, precisano gli autori, sta nel fatto che l'EE la si inferisce attraverso le informazioni riguardanti le tecnologie impiegate per le attività e gli output, mentre l'EI viene inferita attraverso i dati riguardanti i consumi energetici, spesso ottenuti attraverso misure dirette o indagini. Il paragrafo 2.2.1: *Dimensioni di classificazione dello stato dell'arte dei Key Performance Indicator di energetica* (pag. 49) tratta in maniera più approfondita l'aspetto del livello di integrazione dei dati impiegati nei KPI di EE.

Numerosi sforzi di analisi dei trend di EE in termini di energia per unità fisica di output sono stati effettuati, nel settore del Manufacturing, e a bassi livelli di aggregazione, solo per le industry intensive dal punto di vista energetico, come acciaio, carta e cemento (Farla & Blok, 2000), (Phylipsen, Blok, & Worrell, 1998), (Ross & Feng, 1991) mentre per le industry non intensive è stata posta minor attenzione, e i trend di EI sono generalmente analizzati in termini di energia per unità di valore aggiunto.

Energy Saving, Rebound e Backfire Effect

Quando si parla di EE spesso si parla anche di Energy Saving (ES). ES e aumento dell'EE sono spesso utilizzati come sinonimi, ma in realtà l'aumento di EE fa parte del sottoinsieme di leve attraverso cui gli ES sono ottenibili (Bunse, 2011). I saving infatti possono comprendere una parziale o totale riduzione della domanda energetica effettuata da un'entità consumatrice nei confronti della fornitura energetica (Irrek & Thomas, 2008) come mostrato in Figura 2.3.

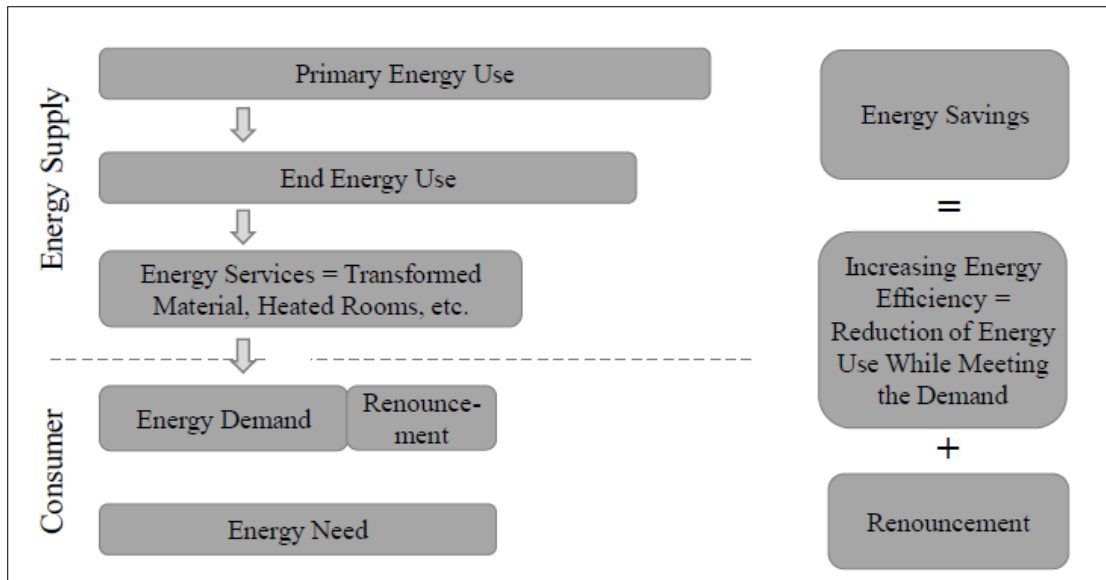


Figura 2.3: Energy efficiency and energy savings. Fonte: Bunse, 2011, basata su Pehnt, 2010.

La Figura 2.3 mostra inoltre i diversi stati di conversione dell'energia durante il processo di fornitura e di consumo (si rimanda al paragrafo *Efficienza energetica nel manufacturing* immediatamente successivo l'approfondimento sui processi di trasformazione dell'energia nel manufacturing).

Una volta definita l'EI si può stabilire in maniera compiuta cosa si intende per ES.

L'ES è definito come il prodotto tra il futuro livello di attività e la differenza tra l'EI in corrispondenza del tempo futuro preso come riferimento con l'EI attuale. (Schipper & Grubb, 2000).

Se E è l'energia utilizzata per una particolare attività, allora:

$$E = A \times I \tag{2.3}$$

dove A è il livello di attività e I è l'intensità energetica corrispondente.

Un ES determina la variazione di A in A' e di I in I', ottenendo così un nuovo utilizzo di energia E', secondo la relazione:

$$E' = A' \times I' \quad (2.4)$$

Se  $I'$  è minore di  $I$ , l'energia risparmiata è pari a  $A' \times (I - I')$ , da cui:

$$ES = A' \times (I - I') \quad [J] \quad (2.5)$$

Secondo alcuni studi gli effetti dei miglioramenti dell'EE ottenuti tramite una riduzione dell'utilizzo di energia potrebbero essere controbilanciati parzialmente, o addirittura del tutto, dal cosiddetto *rebound* e *backfire effect*, discusso in maniera compiuta da Hanley et al. (2009) e dal Breakthrough Institute, un istituto di ricerca americano che si occupa di energia e clima attraverso il rapporto "Energy Emergence: rebound and backfire as emergent phenomena", una revisione di 96 studi pubblicati negli ultimi anni su questo argomento hanno calcolato che, a causa di questo fenomeno, si può perdere fino al 30% del risparmio di energia conquistato grazie all'aumento dell'efficienza; una percentuale che potrebbe crescere fino a oltre il 50% nel 2030 a causa della maggiore diffusione di queste tecnologie salva-energia.

Questo tipo di effetto si manifesta nel fatto che  $E'$  potrebbe essere più grande di  $E$ , perché nell'intervallo di tempo in cui  $I$  è diventato  $I'$ ,  $A$  è accresciuto della relativa quantità diventando  $A'$ . Ora, la diminuzione in  $I$  ha essa stessa potuto causare una crescita di  $A$  in  $A''$ , ottenendo così un  $E'' = A'' \times I'$

Si potrebbe investigare sull'aumento di  $A'$  dovuta alle maggiori entrate o output nel momento in cui  $I$  diminuisce, come segno di un importante effetto feedback o cambiamento strutturale determinato da una più bassa intensità energetica o dei costi relativi. Anche se  $I$  aumenta quando i prezzi dell'energia diminuiscono si ha un effetto che può essere considerato in linea di massima analogo al rebound effect (Schipper & Grubb, 2000).

Citando due esempi pertinenti al Manufacturing, una fabbrica di acciaio che riuscisse ad aumentare l'efficienza energetica, ad esempio, tradurrebbe il vantaggio in un minore costo finale dell'acciaio, il che farebbe aumentare la domanda; oppure un impianto chimico più efficiente potrebbe permettersi di alzare le temperature nel processo produttivo per accorciare i tempi di lavorazione. In alcuni casi, si potrebbe arrivare addirittura a un cosiddetto "backfire", ovvero un effetto tale per cui l'energia consumata con un sistema più efficiente supererebbe quella che si sarebbe consumata prima del miglioramento dell'efficienza. In altri termini, la perdita di energia risparmiata sarebbe superiore al 100% (Pulcinelli, 2010). Si conclude dunque che gli ES non implicano necessariamente che l'utilizzo totale di energia sarà più basso, ma solo "minore che altrimenti", e questo perché nel tempo in cui vengono implementate tecniche ES, l'intero sistema cresce e si evolve.

Al momento non sono state formalizzate compiutamente dei metodi per affrontare direttamente questo problema: alcuni economisti hanno avanzato qualche proposta, ad esempio le facilitazioni per la ricerca di fonti di energia rinnovabili e la carbon tax; ad ogni modo un monitoraggio *intelligente* tramite un sistema di misura delle performance di EE e dei consumi energetici costituisce senz'altro un valido supporto per il riconoscimento di questo tipo di effetti.

#### **2.1.4: Efficienza energetica nel manufacturing**

Nel capitolo 1 sono state riportate in maniera compiuta le motivazioni alla base delle quali risulta necessaria una crescente attenzione verso il tema dell'EEM, che concettualmente consiste nel considerare l'EE all'interno del set di performance (costo, qualità, flessibilità, tempi di risposta) con le quali il Manufacturing viene normalmente valutato.

Appurata la definizione di riferimento per i KPI e l'EE, questo paragrafo ha come obiettivo quello di inquadrare brevemente le differenti *domini di applicazione* e gli *approcci* esistenti dell'EEM, a prescindere dalla specificità delle singole industry al suo interno, circoscrivendo quelli coinvolti all'interno della trattazione.

In particolare, il panorama dell' EEM può essere idealmente descritto attraverso una matrice bidimensionale le cui dimensioni sono proprio il dominio di applicazione e i possibili approcci adottati (Cannata, 2011).

I processi che avvengono all'interno del manufacturing sono considerati come trasformazioni di input (materie prime ed energia) in output definiti (prodotti finiti, scarti di prodotto, sprechi di energia) compiute da persone ed equipment (macchine) secondo metodi definiti.

All'interno del manufacturing avvengono diversi processi, collegati tra di loro: il profilo dell'energia della *rete* di processi all'interno di una linea di produzione o di un sistema è il risultato di operazioni dinamiche e interazioni tra ciascun elemento della rete (Herrmann & Thiede, 2009).

La Figura 2.4 inquadra il sistema di riferimento per l'EEM preso in esame in termini di *dominio di applicazione* dell'EEM di uno stabilimento produttivo, ovvero:

- energy sources;
- utilities;
- manufacturing system.



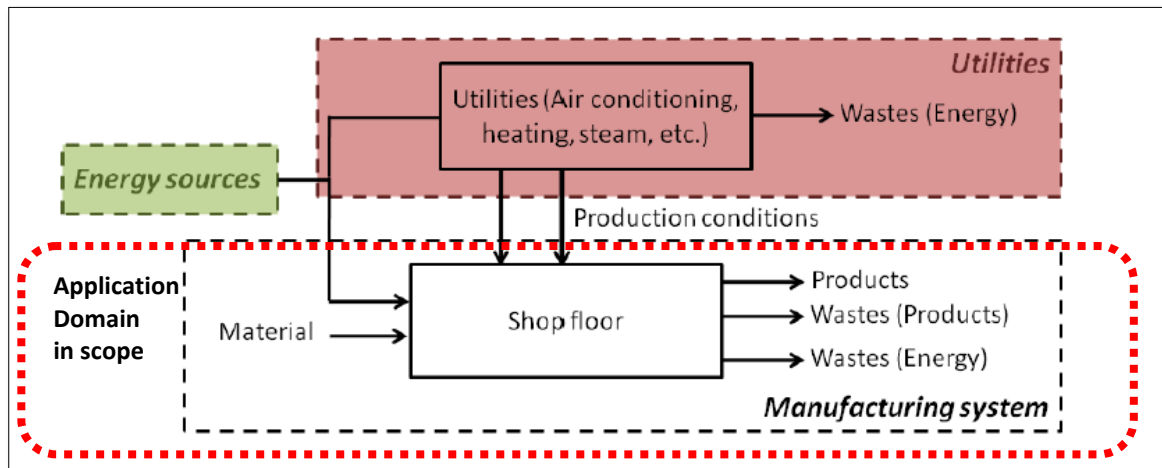


Figura 2.4: Lo stabilimento produttivo secondo un'ottica EEM application domain-based. Tratto da "System considered for the state of the art", Cannata, 2011.

All'interno del sistema di riferimento considerato per l'EEM viene circoscritta, attraverso il box tratteggiato in rosso, il MS come dominio di interesse per questa trattazione. La scelta fa chiaramente riferimento all'inserimento del MS all'interno dello *scope* della trattazione, al contrario dei TBS (in figura rappresentati dalle utilities) che sono *out of scope*.

Ad ogni modo si riporta una descrizione sui tre domini di applicazione e in particolare sugli approcci all'EE per ciascuno di essi, inserita sia per una migliore comprensione del panorama esistente nell'EEM e delle grandezze coinvolte all'interno dei KPI di EE revisionati, e sia in quanto funzionale alla comprensione del focus in figura.

Per quanto concerne l'energia in input (*energy sources*), l'energia nei processi industriali è prevalentemente impiegata sotto forma di elettricità, gas, aria compressa e acqua. L'energia subisce una serie di trasformazioni prima di essere direttamente utilizzata dalle utenze, in questo caso dagli impianti. Spesso nella letteratura che tratta i temi dell'EE –in modo particolare quella dei KPI- si incontrano termini come energia primaria, intermedia, e finale, come mostrato in Figura 2.5 (per un'analisi più dettagliata dei processi di conversione dell'energia si consulti l'allegato 2 "Energy Conversion Steps from Primary Energy to End-Users" in Appendice B).

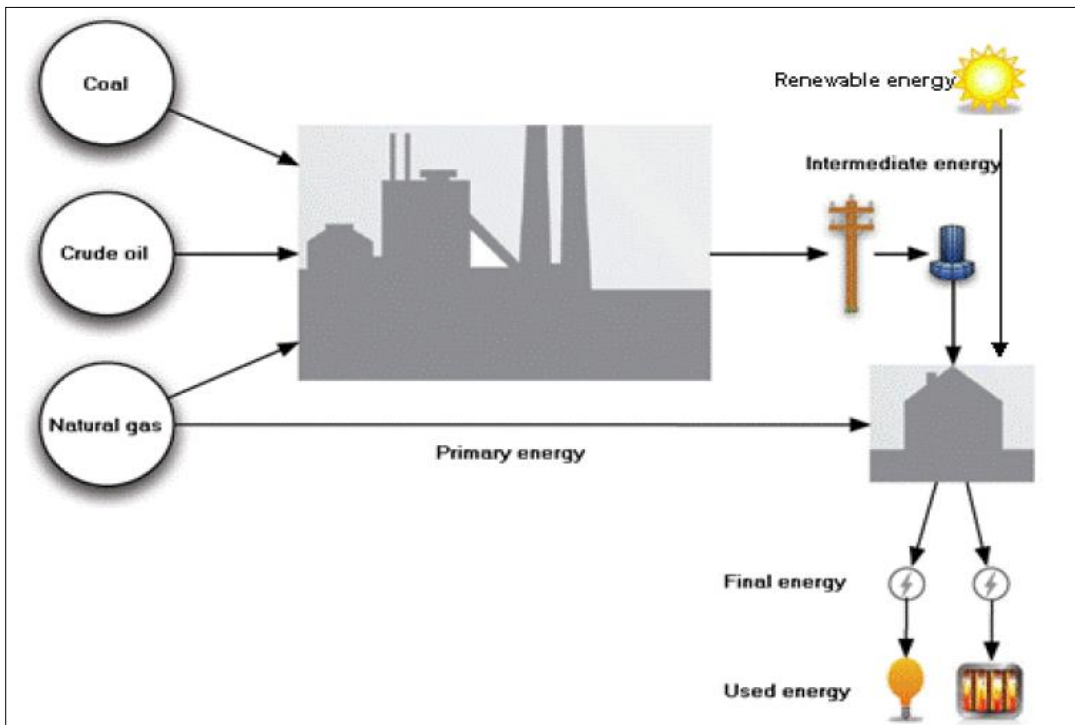


Figura 2.5: "Energy Sources". Fonte: Pandolfo, 2010

In riferimento a ciò, Morvay e Gvozdenac (2008) definiscono come energia primaria tutti i tipi di energia estratta direttamente da risorse naturali, che possono essere divise ulteriormente in rinnovabili e non rinnovabili (Figura 2.6).

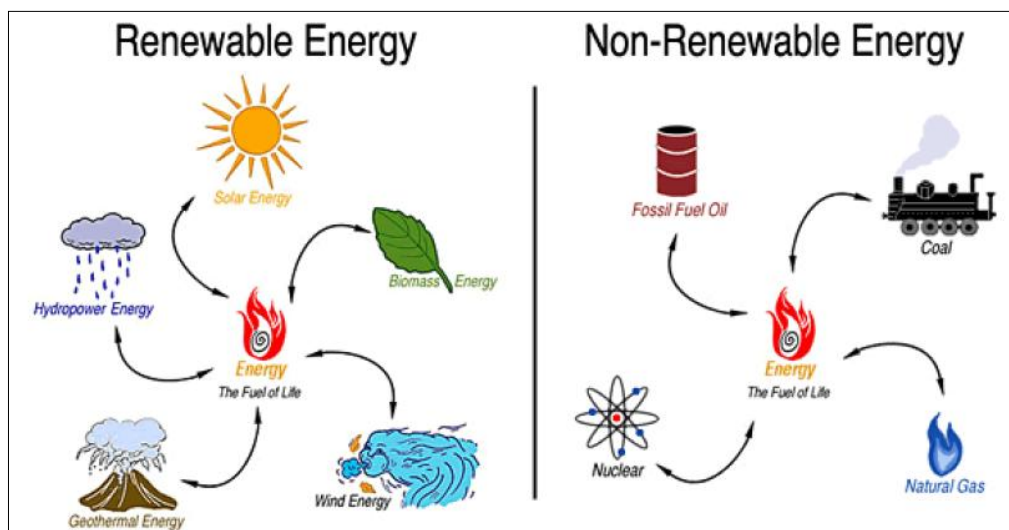


Figura 2.6: "Renewable and Non-renewable energy". Fonte: www.windy-future.info, 2010

Il contenuto di energia primaria è generalmente misurato attraverso il toe (ton of oil equivalent). Tramite opportuni fattori di conversione

$$1 \text{ toe} = 11\,630 \text{ kWh} = 41\,870 \text{ MJ}$$

il contenuto di energia primaria di tutti i combustibili può essere convertito al toe.

L'energia intermedia è invece l'energia primaria convertita in altre forme, mentre l'energia finale è quella che i consumatori comprano o ricevono necessaria per portare avanti le loro attività. Citando il caso di uno stabilimento di manufacturing, possono essere esempi la trasmissione di elettricità, l'illuminazione, il trasporto, la produzione di aria compressa, o di calore.

A seconda della finalità di utilizzo all'interno dell'impianto, l'energia si suddivide in energia diretta (direttamente utilizzata nei processi di trasformazione; in Figura 2.4 è l'energia in input al *manufacturing system*) ed energia indiretta, ad esempio utilizzata per la ventilazione, il riscaldamento, il raffreddamento e l'illuminazione (in Figura 2.4 è l'energia in ingresso alle *utilities*<sup>14</sup>).

Come si evince dalla Figura 2.4 l'energia, oltre ad essere utilizzata, viene anche dispersa, sia se indirizzata alle *utilities* che al *manufacturing system*.

Le perdite di energia possono essere, per alcuni tipi di impianti o macchine, anche significative, e possono essere divise in due categorie principali: le perdite intrinseche e le perdite evitabili.

Le perdite intrinseche, ovvero quelle non evitabili, sono quelle che dipendono da leggi termodinamiche e fisiche: ad esempio le linee di distribuzione dell'energia elettrica e le tubazioni per il vapore avranno sempre delle perdite associate, anche se propriamente trattate e isolate.

Le perdite evitabili sono perdite risultanti da una progettazione, manutenzione e funzionamento dei sistemi scadente o sub ottimale, ad esempio fuoriuscite di vapore, linee non isolate, combustioni non correttamente regolate, ecc. Le perdite evitabili si concretizzano in opportunità mancate, richiedendo maggiori risorse di energia primaria da consumare per raggiungere l'output richiesto. In aggiunta a questi costi esiste inoltre un problema di degradazione ambientale (UNIDO, 2006).

La discussione sul dominio di applicazione "MS" e i "TBS" appare invece superflua, in quanto ben definiti invece nel capitolo introduttivo (Tabella 1.1 a pag.15).

Molto interessante è invece l'esplorazione degli approcci esistenti per migliorare l'EE: la letteratura fornisce numerosi esempi di quanto gli approcci al miglioramento delle performance di EE e riduzione del consumo energetico (Prindle, 2010) (Morvay & Gvozdenac, 2008)

Audzeyeva (2010) li riassume in Tabella 2.3, suddivisi in tre grandi categorie: organizzativi, operativi e tecnici.

---

<sup>14</sup> Indicati nel capitolo 1, così come nel resto della trattazione, come TBS.

Tabella 2.3: "Classification of approaches to energy efficiency". Fonte: Audzeyeva, 2010.

<i>Organizzativi</i>	• Establishing of energy management structures (energy manager, energy team)
	• Use of energy management systems
	• Participation in energy programs
	• Energy and environmental certification
	• Support of energy efficiency consulting companies
	• Investing in energy efficiency measures
<i>Operativi</i>	• Company-wide energy program
	• Energy efficiency initiatives and campaigns
	• Energy training
	• Optimisation of production processes
	• Responsible operation
	• Use of direct energy metering
<i>Tecnici</i>	• Appropriate monitoring and maintenance of production systems
	• Optimisation of production system design
	• Use of controls and other components to optimise plant systems' energy efficiency end-use
	• Considering energy efficiency in equipment acquisition.

Poiché la clusterizzazione degli approcci che esegue l'autore è orientata ad un obiettivo di lavoro diverso da quello della trattazione seguente, verranno considerati solo due principali cluster di approcci all'EEM, esaustivi per questa trattazione. Essi possono riferirsi a tutti e tre gli elementi del dominio di applicazione, e sono:

- l'approccio tecnologico –che mira a migliorare l'EE attraverso modifiche tecnologiche, ad esempio attraverso modifiche apportate al layout del sistema produttivo, progetti di reingegnerizzazione, o di acquisto di risorse più efficienti;
- l'approccio gestionale –che mira a migliorare l'EE attraverso leve gestionali ed organizzative, che valutano *come* le risorse vengono utilizzate .

Di seguito verranno illustrati esempi di approcci utilizzabili nei tre domini di applicazione.

Per quanto concerne le fonti di energia (*energy sources*), si tratta di tutte le attività che contribuiscono ad aumentare l'EE interessano la riduzione di forniture di energia il cui impatto ambientale è più rilevante, optando per fonti alternative (un esempio può essere l'installazione di pannelli solari che alimentino lo stabilimento).

Dalla Figura 2.7 si vede come l'aumento dell'EE a livello *manufacturing system* (dominio *in scope*) possa essere ottenuto, ad esempio, da tecnologie/macchine più efficienti, da un recupero dell'energia da utilizzare all'interno del processo stesso, da un ulteriore uso dell'energia sprecata dai diversi processi (ad esempio la cogenerazione), da un incremento dell'efficienza di conversione dell'energia o da un'ottimizzazione delle pratiche operative per ridurre la domanda energetica (ad esempio l'ottimizzazione delle sequenze produttive, la riduzione dei consumi energetici nello stato di idle o stand-by) (Erlach, 2010), (Erlach & Westkämper, 2009).

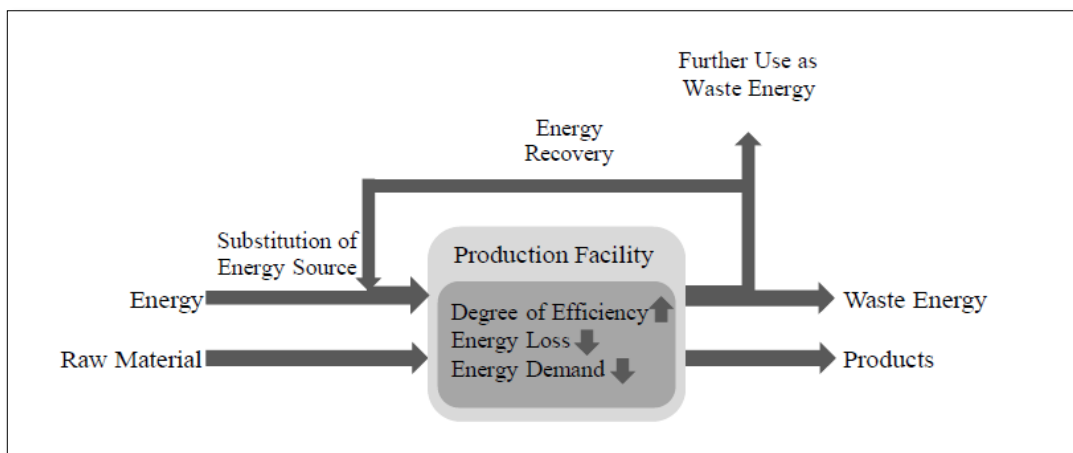


Figura 2.7: “Measures to increase energy efficiency of production facilities”. Fonte: Müller et al. 2009, rielaborato da Bunse et al. 2011.

Per quanto concerne il livello *utilities* l'EE sarà rivolta a tutte quei parametri (temperatura, illuminazione, ecc.) che determinano le condizioni di regolare funzionamento dei processi produttivi. Ad esempio un'iniziativa in questo senso può essere la sostituzione delle lampadine tradizionali con dei LED.

In virtù del focus della trattazione sull'EM (si veda paragrafo

1.1.3: Focus di ricerca nel capitolo 1), risulta chiaro che l'approccio all'EEM per questo lavoro sia quello orientato al management. Il focus della trattazione in termini di dominio di applicazione è quello del MS, come riportato a pag. 36.

In conclusione, la Figura 2.8 illustra una matrice che approssimativamente descrive l'EEM nelle sue due dimensioni, circoscrivendo la “cella di EEM” in cui la trattazione opera.

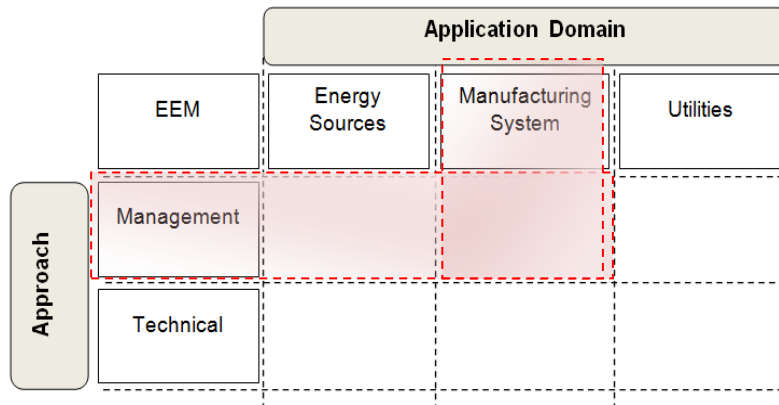


Figura 2.8: Dimensioni dell'EEM e focus nella trattazione.

Sebbene nel capitolo 1 sia stata fornita la motivazione ad un approccio di miglioramento dell'EE orientato alla gestione (EM), la letteratura fornisce numerosi esempi che avvalorano la scelta di un approccio gestionale all'EE anziché tecnologico. Ad esempio, in riferimento alle perdite di energia discusse in questo paragrafo a pag.38, nel breve termine migliorare l'EE significa agire direttamente su ciò che è stato definito come perdita evitabile, mentre agire sulle perdite intrinseche costituirebbe invece una soluzione di lungo termine (un esempio di soluzione di questo tipo potrebbe essere quella di riprogettare un processo o un item di un impianto per assicurare che le perdite intrinseche dovute a ragioni tecniche siano tenute al minimo (UNIDO, 2006b)). Ma l'esperienza pratica riporta che le perdite evitabili sono tipicamente molto più significative di quelle tecniche, e le perdite evitabili sono spesso il risultato da un management inadeguato degli impianti, processi, stabilimenti e in molti casi da un inappropriato comportamento delle entità consumatrici.

In virtù del focus su un approccio di management applicato al manufacturing system, il paragrafo 2.1.5 a pagina successiva descrive le linee principali dell'Energy Management.

### 2.1.5: Energy management

Le singole organizzazioni non hanno controllo sui prezzi dell'energia, le policy governative o l'economia globale, ma possono migliorare il modo in cui esse stesse gestiscono l'energia che utilizzano, senza contare il fatto che lo sviluppo e la messa in atto di tecnologie per le nuovi fonti di energia o per quelle rinnovabili [che soddisfino i fabbisogni industriali] può richiedere anche molto tempo (ISO, 2011). Sono soprattutto queste le motivazioni portanti ad un crescente interesse all'applicazione dell'Energy Management (EM) nel mondo industriale, motivazioni supportate dal fatto che migliorare le performance dell'energia consente di ottenere rapidi benefici conseguenti alla riduzione dei costi e dei consumi energetici. Questi costi non vanno considerati in termini puramente economici, perché -come riportato precedentemente- l'energia ha un suo impatto anche sui costi ambientali e sociali, dovuti a problemi come la scarsità delle risorse e i cambiamenti climatici. In passato alcuni studi avevano già discusso circa

l'importanza dell'EM all'interno delle diverse industry e i possibili approcci per la sua implementazione (Wohinz and Moor, 1989), (Wanke and Trenz, 2001).

Per alcuni autori, come ad esempio Capehart, Turner e Kennedy (2008) l'EM si riferisce all'utilizzo efficiente ed efficace dell'energia al fine di massimizzare i profitti e aumentare la posizione competitiva.

Morvay e Gvozdenac (2008) hanno allargato e rielaborato la definizione di EM affermando che “ ..essa tratta l'utilizzo efficiente dell'energia, dell'acqua e delle altre risorse, la minimizzazione degli sprechi nelle operations del manufacturing e il miglioramento continuo delle performance di utilizzo delle risorse in un'azienda”. Gli autori oltretutto aggiungono che “ l'energy management collega e mette in relazione l'utilizzo dell' energia agli output produttivi, con l'obiettivo di raggiungere il livello di output richiesto con il minimo utilizzo di energia e di altre risorse”.

Storicamente, una delle prime definizioni di EM è stata quella di O'Callaghan e Probert (1977), successivamente raffinata da Bunse (2011), definizione che viene presa come riferimento per questo lavoro per il suo maggior focus sul loop di miglioramento continuo:

L'energy management è l'applicazione di risorse dirette alla fornitura, conversione, e utilizzo dell'energia che essenzialmente coinvolgono il monitoraggio, la misura, la registrazione, l'analisi, l'esame critico, il controllo, il reindirizzamento e il miglioramento dei flussi di energia e di materiali attraverso sistemi che consentano di spendere la minor quantità di energia per il raggiungimento degli obiettivi interessati (O'Callaghan, 1977, adattata da Bunse, 2011).

La riduzione dei costi e dei consumi energetici, che impattano sui tre aspetti della *triple bottom line*, può essere ottenuta attraverso misure economiche, tecnologiche e organizzative o una combinazione di queste (Schieferdecker et al., 2006); in particolare Wanke e Trenz (2001) suggeriscono come l'energy management sia un'area trasversale a più funzioni, e applicata all'industria deve includere aspetti come l'ottimizzazione della gestione delle informazioni energy-related, un uso efficiente dell'energia in produzione, una sistematica riduzione dei costi dell'energia, la riduzione dell'impatto ambientale relativo all'utilizzo dell'energia, una crescita della consapevolezza verso un utilizzo razionale dell'energia che includa un programma di training rivolto ai dipendenti.

Recentemente la maggior attenzione verso l'EM è testimoniata da un aumento del numero di studi a riguardo (Herrmann & Thiede, 2009), (Rahimifard, Seow, & Childs, 2010), (Thollander P. &., 2010) e dai relativi standard nazionali e

internazionali (ISO50001, EN16001) recentemente sviluppati finalizzati a guidare le aziende verso la realizzazione di un Energy Management System (EnMS).

Per EnMS può essere definito come un framework per la gestione sistematica dell'energia finalizzato ad accrescere l'efficienza energetica, ridurre i costi relativi e ridurre le emissioni di GHG<sup>15</sup> (Pandolfo, 2010). Esso rappresenta un approccio sistematico per monitorare e ridurre il consumo di energia in ogni tipo di organizzazione o impresa, sulla quale la norma internazionale ISO 50001:2011, *Energy management systems – Requirements with guidance for use* pone il suo focus attraverso la specificazione dei criteri di misurazione, documentazione e reportistica necessaria a qualificare i sistemi di gestione dell'energia. La norma nel suo testo tende a sollecitare lo sviluppo di una politica energetica che consideri, tramite la comparazione e l'analisi dei consumi, informazioni utili per mettere in pratica piani di monitoraggio dell'efficienza energetica.

La ISO 50001 sostituisce la preesistente EN 16001, in vigore dal 2009 in Europa, e si distingue da quest'ultima principalmente per il diverso approccio che l'organizzazione deve avere nei confronti del proprio sistema di uso e consumo dell'energia (per un ulteriore approfondimento si consulti l'allegato 2 in Appendice B). Nonostante le differenze, il passaggio dalla EN 16001 alla ISO 50001 promette di non essere particolarmente complesso, grazie anche al lavoro effettuato dagli enti di normazione europei durante i lavori di elaborazione della ISO 50001.

Per quanto concerne l'approccio metodologico, la ISO 50001 è basata sul ben noto loop PDCA (Plan-Do-Check-Act) che guida l'implementazione di politiche energetiche corrette caratterizzate da obiettivi concreti, volti alla messa in atto di azioni mirate e, successivamente, al controllo ed alla verifica delle modalità di riduzione dell'utilizzo di energia, con l'obiettivo del miglioramento continuo (Figura 2.9).

Anche in questo caso si utilizza il box tratteggiato per circoscrivere "l'area di copertura" della trattazione all'interno del EM. La metodologia si propone in particolar modo di sviluppare particolari misure, che, analizzate in modo opportuno e inserite in un appropriato sistema di gestione delle stesse, abiliteranno il continuous improvement.

---

<sup>15</sup> GHG sta per Green House Gases, ovvero gas ad effetto serra.



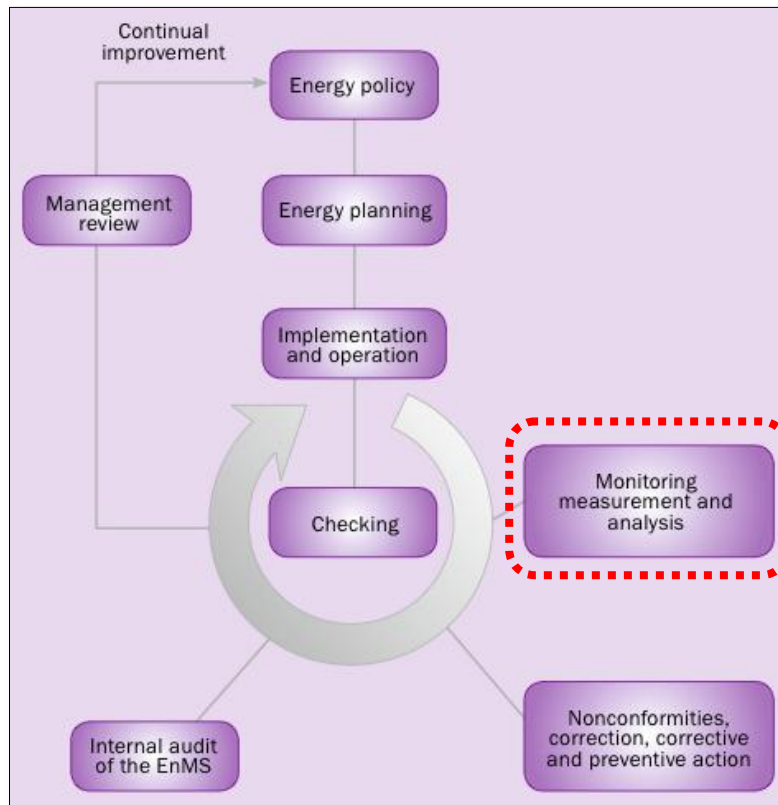


Figura 2.9: ISO 50001: loop di miglioramento continuo. Fonte: <http://www.iso50001.de/index.php?id=home&L=1>

Il ciclo è composto dai seguenti elementi:

- Plan: si esegue una revisione dello stato attuale e si stabilisce la baseline, gli Energy Performance Indicators (EnPIs) da monitorare, gli obiettivi, i target, e il piano d'azione necessario per raggiungere gli obiettivi in accordo con le opportunità di miglioramento delle performance e delle policy riguardanti l'energia;
- Do: vengono effettuate le azioni sistemiche, infrastrutturali e comportamentali previste nel Plan, promuovendo la consapevolezza dell'organizzazione e la comunicazione interna ed esterna;
- Check: si monitorano e misurano i processi e le caratteristiche chiave delle operations che impattano sulle performance energetiche in vista della policy energetica e degli obiettivi riportando i risultati;
- Act: intraprendere azioni per migliorare continuamente le performance energetiche e l'EnMS.

Il sistema di gestione secondo il formato Plan-Do-Check-Act assicura che la norma possa essere utilizzata da tutte le organizzazioni di qualsiasi dimensione e tipologia; ragion per cui ci si aspetta che la ISO 50001 possa influenzare la gestione di circa il 60% dell'energia mondiale. Ciononostante, sono ancora pochi

gli studi sull'applicabilità ed efficacia di questo tipo di standard, studi che presumibilmente dovranno essere effettuati per via della presenza di alcune barriere/difficoltà di implementazione; ad esempio sono le stesse aziende a doversi occupare della specificazione dei target, della selezione dei KPI di EE adatti, l'implementazione pratica dei tool di supporto alle decisioni o l'adattamento dei sistemi ICT, sulla base del proprio specifico caso (Bunse et al, 2010).

### **2.1.6: L'ICT a supporto all'efficienza energetica nelle organizzazioni**

I consumi energetici in produzione possono essere ridotti attraverso i miglioramenti dell'EE a livello impianto, o attraverso l'ottimizzazione dei sistemi di produzione, o apportando variazioni nel piano di produzione e la realizzazione di apposite tecnologie: l'ICT (Information and Communication Technology) può supportare questo tipo di misure in maniere diverse (Bunse, Vodicka, Schönsleben, Brühlhart, & Ernst, 2011).

Per questo motivo il ruolo dell'ICT in qualità di supporto all'EE è di tipo multifunzionale. L'ICT rende disponibili le informazioni, rende trasparenti i saving di tipo energetico e finanziario ottenuti dagli investimenti in EE, riduce la complessità e facilita il controllo automatico dei processi del manufacturing. Oltretutto ottenere dati in tempo reale e informazioni accurate potrà essere possibile proprio integrando le misure di EE nei sistemi ICT, aiutando così i decision maker a prendere decisioni di business più efficaci (Bunse & Vodicka, 2010).

Molti studi hanno messo in risalto il ruolo chiave dell'ICT nell'EEM. Ad esempio l'EC ha messo in luce l'enorme potenziale della rete di sensori ed attuatori, i controlli intelligenti, i componenti e sistemi *smart*<sup>16</sup> i sistemi di monitoraggio e gli algoritmi di scheduling (EC, 2009). Secondo l'IEA (2009), tra i requisiti che occorre soddisfare per la costruzione di indicatori efficaci che valutino il potenziale e l'impatto delle misure di EE vi è la raccolta di dati dettagliati riguardanti i consumi energetici a partire dal livello *sub-sector*, e il complemento di questi dati a valore aggiunto con gli elementi chiave della produzione fisica. Per questo motivo uno degli hot topic principali nell'ambito dell'EE e della sostenibilità è quello del miglioramento e accrescimento di tutti gli strumenti riassunti in Figura 2.10, poiché essi costituiscono le fondamenta informative per la realizzazione degli EnMS e sistemi di controllo avanzati nel manufacturing come negli altri settori.

---

<sup>16</sup> Per sensore smart si intende "un trasduttore che integra le funzioni necessarie alla corretta rappresentazione della grandezza misurata o controllata. Queste funzionalità tipicamente sono in grado di semplificare l'integrazione del trasduttore in applicazioni che utilizzino strutture di rete". Fonte: IEEE 1451.2

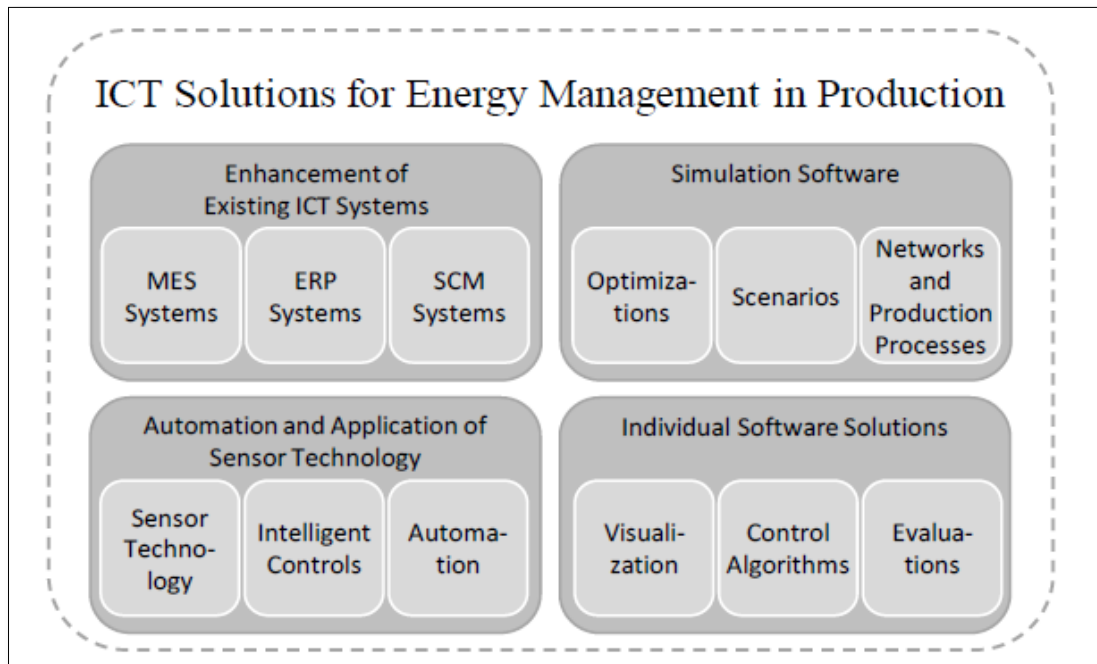


Figura 2.10: "ICT solutions for Energy Management in Production". Fonte: Bunse & Vodicka, 2011

Altri studi recenti hanno messo in risalto il ruolo abilitante dell'ICT alla riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> (The Climate Group, 2008): l'ICT supporta la riduzione dei consumi energetici nei processi del manufacturing in quanto consente il controllo dei processi produttivi così come la stima e la valutazione di investimenti *energy-saving*. In particolare, il ruolo dell'ICT viene descritto da The Climate Group nel modo seguente: "Mentre il settore [dell'ICT] è intenzionato ad aumentare significativamente l'efficienza energetica dei suoi prodotti e servizi, l'influenza più estesa dell'ICT è quella di abilitare l'efficienza energetica degli altri settori, un'opportunità che potrebbe condurre ad un saving la cui entità è cinque volte più grande delle emissioni totali dell'intero settore dell'ICT nel 2020". Come mostra la Figura 2.11, al settore dell'ICT è imputabile un'impronta di carbonio di 1.4 Gt CO<sub>2</sub> mentre l'effetto abilitante dell'ICT può determinare la riduzione di 7.8 Gt di emissioni di CO<sub>2</sub>.

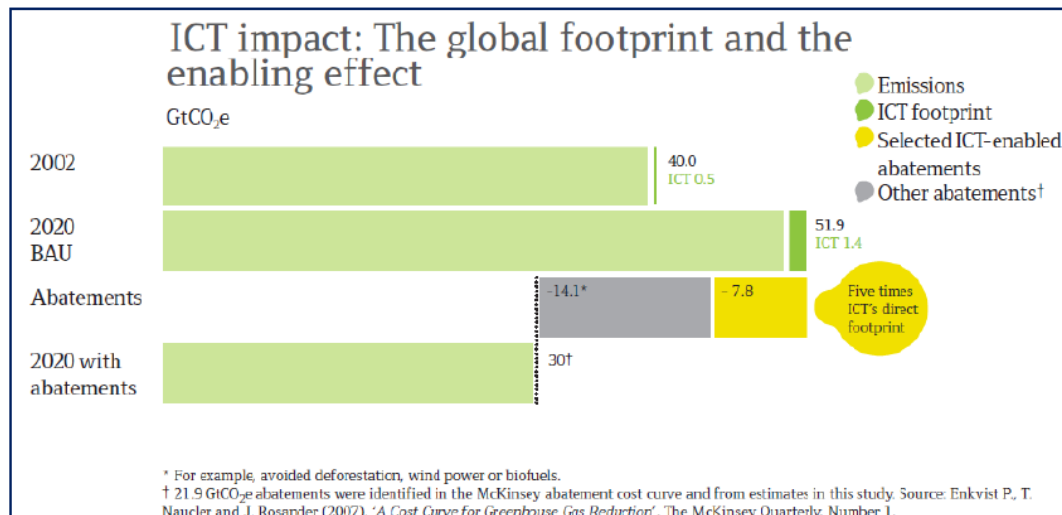


Figura 2.11: Il ruolo potenziale dell'ICT a supporto dei saving energetici. Fonte: The Climate Group, 2008.

L'ICT all'interno del manufacturing consiste in una serie di differenti sistemi, tra i quali gli Enterprise Resource Planning (ERP), i Manufacturing Execution Systems (MES), gli SCADA (System Control And Data Acquisition), il Supply Chain Management (SCM), il Product Lifecycle Management (PLM), e altre soluzioni special-purpose.

Tra questi, gli ERP, i MES sono gli strumenti software più vicini al livello shop floor e conseguentemente al monitoraggio e al controllo dei processi produttivi. I moderni sistemi ERP integrano la pianificazione delle risorse ai processi di business nell'intero panorama aziendale: essi contribuiscono, ad esempio, al miglioramento dello schedulino degli ordini di produzione a favore di una maggior EE.

Per poter supportare l'EM, i sistemi ERP devono estendere la loro azione solo sulle aree target convenzionali come costo, qualità e lead time, ma anche integrare KPI appropriati che monitorino l'efficienza nelle risorse e nell'energia (Bunse & Vodicka, 2011). Le aziende del settore degli ERP hanno già avviato iniziative che includono l'analisi delle risorse, delle emissioni e dell'EE (SAP, 2010), (Rey, 2002).

I MES trattano le informazioni a supporto dell'ottimizzazione dei processi dalla ricezione dell'ordine all'uscita dei prodotti finiti, per questo motivo possono aiutare i *process owner* a capire come utilizzare in modo migliore le risorse energetiche all'interno dei processi produttivi (Rockwell Automation, 2009).

Secondo lo studio di McKinsey (2009) il beneficio potenziale delle diverse soluzioni ICT per l'energy management a livello globale si stima intorno ai 15 miliardi di euro nel 2020, tuttavia, per rendere concreto questo beneficio è richiesta una soluzione ICT integrata dei diversi livelli -dallo shop floor al livello management- e che includa i diversi pacchetti software utilizzati in azienda. Al momento infatti, la sfida principale risiede nel fatto che questi software (ERP,

MES, SCADA, ecc ecc) non sono integrati tra di loro, sfida che attualmente si sta affrontando -ad esempio- tramite il progetto Europeo PLANTCockpit (Production ogistics And Sustainability Cockpit<sup>17</sup>), che si propone di integrare questi differenti sistemi al fine di creare un ambiente centrale che abbia la visibilità su tutti i processi intralogistici.

## 2.2: Key Performance Indicator di efficienza energetica

Appurato il background teorico di ricerca, la sezione corrente si propone di illustrare lo stato dell'arte dei KPI di EE attraverso opportune dimensioni di classificazione (paragrafo 2.2.1: *Dimensioni di classificazione dello stato dell'arte dei Key Performance Indicator di nergetica*). Lo stato dell'arte (paragrafo

2.2.2: *Stato dell'arte dei Key Performance Indicator di efficienza energetica*) si conclude con una serie di tabelle, per ciascuna categoria di indicatori individuata, in cui sono riportati i KPI di EE attualmente esistenti.

In primis: *a cosa servono i KPI di EE?*

I KPI di EE possono essere utilizzati per scopi differenti; l'LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory) (2007) ha identificato quattro applicazioni:

- analisi storica dei trend;
- come input ai modelli economici e tecnologici;
- per la progettazione di policy e monitoraggio dei progressi nel tempo;
- benchmarking (ad esempio confronti *cross-country* o confronti con le best practice).

La metodologia che verrà proposta nella trattazione abbraccia, nei suoi sviluppi futuri, potenzialmente tutte e quattro le applicazioni, anche se è doveroso precisare che, poiché la trattazione è circoscritta a livello stabilimento, il benchmarking ha una sua valenza applicativa solo se gli sforzi di standardizzazione e adozione di questo tipo di tool per il monitoraggio e l'analisi dei consumi energetici seguiranno una direzione più definita nel tempo, nonché "sentita" da un maggior numero di imprese e organizzazioni. Il raggiungimento di questa condizione vede come prerequisito non solo un parziale abbattimento delle barriere di EE (paragrafo 1.3.2: *Barriere* ), ma anche una condizione di maggior sviluppo e pervasività delle tecnologie che consentono di monitorare i KPI di EE, nonché l'inserimento e l'integrazione delle performance di EE all'interno del tradizionale set di prestazioni del manufacturing.

---

<sup>17</sup> <http://www.plantcockpit.eu/>

### **2.2.1: Dimensioni di classificazione dello stato dell'arte dei Key Performance Indicator di efficienza energetica**

Una review completa ed esaustiva dei KPIs di EE non può ridursi ad un mero “elenco” degli indicatori attualmente esistenti, bensì deve essere in grado di classificare gli indicatori attraverso opportune dimensioni che consentano di apprezzarne, anche se intermini indicativi, il possibile impiego come tool di monitoraggio e analisi all'interno delle organizzazioni.

La letteratura riporta un numero esiguo di review dei KPI di EE, e ben poche sono conseguentemente le analisi approfondite sulle possibili dimensioni attraverso cui classificare i KPI di EE: Bunse & Vodicka (2011) riportano una lista di indicatori di EE dettagliandoli per “tipo” (economico, fisico, termodinamico, ibrido, tecnico e statistico) e “application” (che di fatto si riferisce al livello di aggregazione dei dati, che Bunse dettaglia in aggregati, disaggregati, ad hoc), Cannata (2011) fa riferimento ai livelli decisionale (strategico, tattico e operativo) e al confine di misura a cui l'indicatore si riferisce definito come “scale” (*machine tool, line, factory*), mentre Munoz Lopez (2010) fa riferimento al livello decisionale e al livello di aggregazione.

Questo lavoro trae le basi da questo tipo di classificazioni, tuttavia, come verrà sottolineato in seguito, si tratta di review che nella maggior parte sono approssimative, poiché in alcuni casi fanno riferimento, piuttosto che agli indicatori “puntuali”, a “tipi” di KPI (come ad esempio Energy Intensity, o Degree of Energy Efficiency).

Poiché ci si propone di costruire una review completa dei KPI di EE, si investigherà non solo sugli indicatori “tipo” ma anche sui singoli indicatori “puntuali” (ad esempio “transmission and distribution losses percentage”), associando (previa esistenza di un legame ben visibile) ciascun “tipo” di indicatore con gli indicatori “puntuali” riscontrabili nella letteratura o nelle pratiche aziendali. Lo stato dell'arte dei KPI di EE verrà organizzato in una serie di tabelle (a partire da Tabella 2.7 a pag.69) che riportano per ciascuna tipologia di indicatori i singoli indicatori che puntualmente rappresentano esempi tangibili e degli indicatori generici normalmente riscontrati nelle review, classificati secondo le dimensioni illustrate in questo paragrafo.

Le categorie di fonti consultate per rendere più ricco e completo lo stato dell'arte dei KPI di EE sono -oltre alla tradizionale letteratura accademica che si è occupata di indicatori di efficienza energetica- report da organizzazioni e istituti (ad esempio Phylipsen, 2010; Hammond, Adriaanse, Rodenburg, Bryant, & Woodward, 1995), normative o standard (ad esempio il GRI, 2006) oppure progetti ed iniziative particolari (ad esempio Boyd, Dutrow, & Tunnessen, 2008 nel progetto ENERGY STAR®; KAP, 2011) rivolte a questo tipo di tematiche.

Coerentemente con quanto esaminato nella letteratura precedente, le dimensioni di classificazione impiegate per lo stato dell'arte sono:

- a. livello di aggregazione dei dati –articolato in dati aggregati e dati disaggregati;
- b. scale –articolato in *site*, *work center*, *work unit*;
- c. livello di decisione –articolato in strategico, tattico e operativo.

a. Livello di aggregazione dei dati

Nel paragrafo

2.1.2: **K** a pag. 26 è stato descritto come i KPI possano essere espressi in termini relativi o assoluti, e –in base al loro uso e applicazione- possano essere composti da dati aggregati e/o pesati (ISO14.031, 1998). Per quanto concerne gli indicatori relativi, normalmente viene preso come riferimento la quantità prodotta (di solito in tonnellate); se ciò non fosse possibile, potrebbero essere prese in considerazione le vendite, il numero di dipendenti, o i giorni di produzione. I dati possono essere raccolti a livello impianto, o da siti produttivi separati, dipartimenti, centri di costo, macchine distinte.

Come già discusso precedentemente, un indicatore<sup>18</sup> di EE non è necessariamente migliore di un altro: ogni indicatore possiede un suo messaggio ed un suo specifico utilizzo: se un indicatore fosse utilizzato per un messaggio diverso, per il quale esso non è appropriato, i trend e i confronti sarebbero interpretati erroneamente; per questo motivo la selezione degli indicatori deve essere contestuale ad una loro corretta comprensione. E' chiaro che la selezione dell'indicatore di EE più appropriato è inficiata dalla disponibilità dei dati, soprattutto riguardanti i consumi energetici.

Gli indicatori di EE sono stati storicamente sviluppati per analizzare le performance energetiche a livello nazionale o settoriale, al fine di supportare il decision-making nelle policy. E' comunemente noto in letteratura che dati ad alto livello di aggregazione (solitamente economici e/o riguardanti il livello settoriale) sono più facilmente disponibili e più facilmente comunicabili, mentre -per contro- dati disaggregati (solitamente fisici) hanno il vantaggio di fornire una miglior comprensione dei driver che stanno alla base del cambiamento dei valori dell'indicatore. Phylipsen (2010) afferma come ciò sia dovuto al fatto che ad un alto livello di aggregazione gli effetti dei singoli driver siano mascherati per via della loro combinazione all'interno dell'indicatore. L'utilizzo della produzione fisica negli indicatori si rivela ideale nelle situazioni caratterizzate da un unico output fisico, ad esempio tonnellate di pasta di legno nel settore della carta, o kWh nel

---

<sup>18</sup> NB: Un'assunzione di questo lavoro di ricerca è quella che "KPI di EE" è "indicatore di EE" possano essere considerati termini equivalenti.

settore dell'elettricità, consentendo la comparazione di impianti e aziende all'interno dello stesso settore (Tyteca, 2002).

L'IEA (2007) classifica gli indicatori di EE sulla base dei dati utilizzati per la costruzione degli indicatori stessi (Figura 2.12): la larghezza di ciascun livello della piramide indica la mole di dati richiesti per la realizzazione degli indicatori di EE relativi al livello stesso.

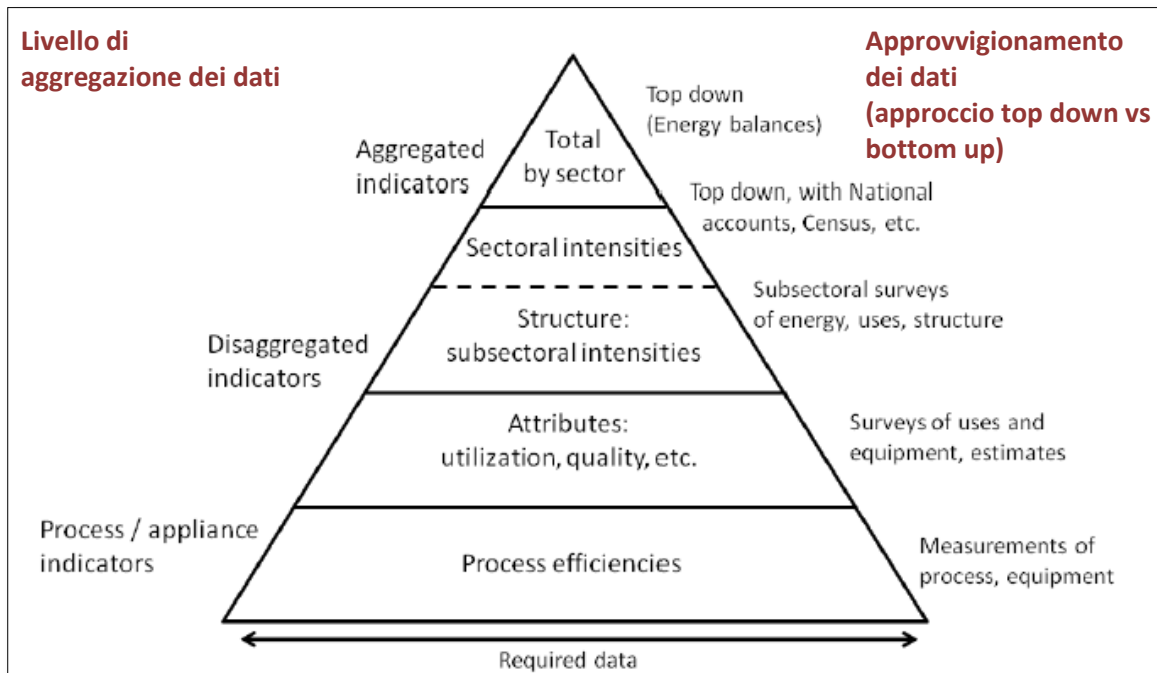


Figura 2.12: "The Energy Efficiency Indicators Pyramid". Piramide multilivello dei dati costituenti gli indicatori di EE. Fonte: IEA, 2007.

Come si può constatare dalla figura, in corrispondenza della base della piramide, più disaggregato è l'indicatore, più sono i dati richiesti.

L'adozione di un livello di aggregazione dei dati, come riporta la stessa figura in corrispondenza del lato destro della piramide, dipende dallo scopo di analisi.

Al livello *aggregated indicators* gli indicatori sono costituiti da dati su base nazionali o settoriale al fine di valutare i trend da punto di vista dell'intero sistema industriale. In corrispondenza di un alto livello di aggregazione normalmente si utilizzano misure di output di tipo economico (ad esempio valore aggiunto o GDP), che rappresentano le misure più utilizzate per rappresentare il livello di attività. Ci si potrebbe domandare per quale motivo, man mano che ci si sposta dalla macchina, all'impianto fino al settore, aumenti l'impiego di misure di tipo economico a discapito di quelle di tipo fisico: ciò è dovuto al problema (attualmente non risolto/risolvibile) di rappresentazione dell'output attraverso un set ristretto e ben definito di prodotti per i quali sono noti i dati sull'utilizzo di energia e gli output fisici (IEA, 2004).

Il valore aggiunto è spesso considerato come un buon candidato all'interno degli indicatori poiché si suppone che rifletta il contributo delle attività del



manufacturing al welfare globale, che ad esempio può essere misurato attraverso il GDP nazionale. Questa scelta non pone particolari problemi a livello macroeconomico, al contrario dell'utilizzo di tale misura a livello corporate, in relazione alle assunzioni, ai punti di vista, e in alcuni casi anche dal contesto (Huizing & Dekker, 1992). Il valore aggiunto economico usato a livello corporate va al di là del "normale" ritorno del capitale. Questo concetto non è facilmente osservabile e di solito non riportato dalle società. Oltretutto esiste un problema particolare riguardante i confronti economici tra settori/nazioni è il differente grado di internalizzazione dei costi ambientali. Società in un'economia con poche tasse ambientali saranno economicamente favorite nei confronti con le società che invece operano in un'economia con "green taxes". Gli indicatori normalizzati attraverso il valore aggiunto o utile favorirebbero dunque quelle società in economie a basso grado di internalizzazione (Tyteca, 2002).

Al livello *disaggregated indicators* i dati sono utilizzati per analisi molto più dettagliate all'interno del settore (Phylipsen, Blok, & Worrell, 1997), tratte da survey o stimati, mentre il *livello process/appliance indicators* si riferisce ad analisi specifiche condotte all'interno delle singole aziende attraverso campagne di misurazione.

Il lato destro della piramide riporta, per ciascun livello, le modalità di approvvigionamento dei dati: i dati relativi ai primi due livelli dal vertice sono disponibili nella maggior parte dei Paesi (ad esempio dagli bilanci energetici nazionali o dalla contabilità nazionale), mentre quelli relativi ai livelli più bassi richiedono differenti fonti informative (organizzazioni di settore, organizzazioni commerciali, censimenti, report analitici) e iniziative specifiche di raccolta di dati. Per la formulazione di strategie e policy di EE più dedicate, efficaci, e misurabili viene raccomandato, per la ragione vista precedentemente un maggior utilizzo di dati, e dunque di indicatori, disaggregati. Nel caso ciò non fosse possibile gli indicatori di alto livello dovrebbero essere combinati con altri indicatori riguardanti informazioni strutturali o comunque esplicative (ad esempio il tasso di penetrazione delle tecnologie, tasso di riciclo dei materiali di produzione, ecc.) (Phylipsen, Energy efficiency indicators: Best practice and potential use in developing country policy making, 2010).

Numerosi sforzi di analisi dei trend di EE in termini di energia per unità fisica di output sono stati effettuati, nel settore del Manufacturing, e a bassi livelli di aggregazione, solo per le industry intensive dal punto di vista energetico, come acciaio, carta e cemento (Farla & Blok, 2000), (Phylipsen, Blok, & Worrell, 1998), (Ross & Feng, 1991) mentre per le industry non intensive è stata posta minor attenzione, e i trend di EI sono generalmente analizzati in termini di energia per unità di valore aggiunto.

b. Livello decisionale

Se all'interno della mappatura dello stato dell'arte dei KPI di EE si considera il livello di aggregazione dei dati, deve essere contestualmente considerato anche il livello decisionale in cui tali indicatori sono utilizzati, giacché esiste una relazione tra il livello decisionale e il livello di dettaglio dei dati richiesti per la costruzione degli indicatori in corrispondenza di ciascun livello gerarchico di decisione, come si vedrà in seguito. Ciononostante, in letteratura i lavori che mettono in relazione i livelli decisionali all'interno delle organizzazioni con gli indicatori di EE da essi utilizzati sono di numero esiguo; oltretutto la maggior parte delle trattazioni descrive la relazione tra il consumo energetico e gli indicatori di EE a livello macroeconomico. Come sostenuto da Reich-Weiser et al. (2008), i processi di decision-making coinvolgono differenti livelli in un gran numero di processi, anche all'interno del manufacturing e dell'EE, ed esiste un'esigenza effettiva e tangibile di adottare un set di indicatori al fine monitorare le performance delle decisioni intraprese per ciascun livello. Ad esempio, la misura dei KPI di EE può essere applicata per un ampio set di scopi differenti: un ingegnere della manutenzione che cerca di ottimizzare il consumo di energia utilizzerà presumibilmente un indicatore di EE termodinamico riferito al livello macchina (e quindi un rapporto dell'output sull'input di energia impiegata), mentre per un'azienda che vuole analizzare il trend di utilizzo di energia in stabilimenti differenti e comparare la loro produttività per unità di energia usata un indicatore fisico-termodinamico si rivela più adatto (Tanaka, 2008). Ciò prova l'utilità di una classificazione dei differenti livelli decisionali in cui gli indicatori vengono sviluppati e utilizzati.

In generale, la struttura dei processi di decision-making nelle aziende, incluse quelle del settore manifatturiero, è definita da tre livelli gerarchici:

- strategico;
- tattico;
- operativo.

Bunse et al. (2009) descrivono brevemente ciascuno di questi livelli in termini di decisioni caratteristiche intraprese –anche in riferimento all'EE-, mentre Rakar e Zorzut trattano soprattutto la connessione esistente tra il livello di aggregazione dei dati -e i sistemi informativi (SI) che manipolano tali dati- e l'orizzonte temporale di pianificazione. I risultati di queste due analisi sono stati riassunti e presentati.

In corrispondenza del livello strategico vengono prese le decisioni di lungo termine, il cui impatto è elevato e trasversale sulla competitività dell'intera azienda. Tipicamente queste decisioni abbracciano un orizzonte temporale pluriennale, considerano come oggetto di analisi l'area di business anziché i singoli prodotti, e vengono prese in relazione al mercato in cui l'azienda opera -o vuole operare- oltre che in relazione all'utilizzo delle risorse. Decisioni strategiche possono essere ad esempio l'entrata in nuovi mercati o la riconfigurazione della supply chain; mentre –per quanto concerne le decisioni di EE prese a questo livello- fanno da esempio la realizzazione di un EnMS, le policy, sistemi informativi e gli investimenti in energia. Ciò sta a significare un utilizzo di dati ad elevato livello di aggregazione per la costruzione dei KPI di EE che monitorino l'efficacia di queste decisioni: i dati necessari per prendere decisioni di tipo strategico sono di tipo aggregato a transazionale, in quanto si estendono e/o provengono al di fuori dell'organizzazione, e in azienda sono tipicamente trattati all'interno di sistemi ERP.

Le decisioni tattiche sono quelle che consentono una realizzazione efficiente ed efficace degli obiettivi fissati a livello strategico. Questo livello decisionale abbraccia un orizzonte temporale di medio termine, di alcuni mesi o alcune settimane, e in esso vengono pianificate le capacità dei processi di manufacturing, gli investimenti in nuovi impianti all'interno dello stabilimento, la reingegnerizzazione dei processi, la manutenzione, ecc. In riferimento alle decisioni di EE, costituiscono un esempio gli investimenti in tecnologie più efficienti, la progettazione dei prodotti, l'analisi dell'efficienza dei sistemi produttivi nella situazione as-is, ecc. Le fonti da cui provengono i dati possono essere sia endogene e sia esogene, e solitamente trattati all'interno dei MES.

Le decisioni operative sono decisioni di breve termine, tipicamente giornaliere o settimanali, finalizzate al raggiungimento degli obiettivi specifici stabiliti al livello tattico, attraverso la conversione dei target definiti in precedenza in precise attività. Ad esempio si stabilisce attraverso una serie di programmi specifici il tipo, la quantità dei prodotti che devono essere realizzati e il timing di produzione. Possibili decisioni operative riguardanti l'EE possono essere il controllo dell'EE dei processi produttivi, il miglioramento delle procedure eseguite dagli operatori, ecc. Ciò implica un impiego di dati disaggregati provenienti la maggior parte dallo shop floor e trattati dai sistemi SCADA per consentire la costruzione di KPI che monitorino l'efficacia di queste decisioni (Rakar & Zorzut).

Come si è potuto constatare nelle descrizioni dei diversi livelli gerarchici, il livello decisionale rappresenta anche della dimensione temporale a cui si riferiscono i KPI di EE inseriti in ciascun livello. Questo significa che, ad esempio, si può stabilire con una certa confidenza come un indicatore strategico possa avere un

orizzonte temporale di un anno o più, mentre un indicatore operativo, a livello di processo, possa avere un orizzonte temporale anche di minuti o secondi.

La Tabella 2.4 riassume le informazioni riportate per ciascun livello decisionale, collegando la dimensione di decision making alla dimensione temporale e al livello di aggregazione dei dati utilizzati per queste decisioni.

Tabella 2.4: Relazione tra la dimensione di decision-making, la dimensione temporale, e la dimensione del livello di aggregazione dei dati, con annesso SI.

Livello decisionale	Orizzonte temporale	Livello di aggreg. dei dati e SI
Strategico	≥ anno	Aggregato transazionale (ERP)
Tattico	anno	Aggregato livello impianto
	trimestre	Disaggregato (MES)
	mese	
Operativo	settimana	Process/Appliance (SCADA)
	giorno	
	ora	
	minuto	
	secondo	

c. Scale

La dimensione *scale* fa riferimento all'oggetto di misura del KPI, ed è quindi direttamente collegato al livello di decision-making all'interno del quale l'oggetto di misura viene monitorato in termini di performance energetiche.

Reich-Weiser et al. (2008) considerano uno *scale* articolato in *Life Cycle Scale*, *Supply Chain Scale*, *Factory Scale*, *Line Scale* e infine *Machine Tool Scale*.

Come specificato dagli autori, le metriche collocate a livello più basso del *Machine Tool Scale* solitamente perdono generalità poiché necessitano di essere adattate allo specifico processo analizzato, mentre le metriche a più alto livello di *scale* coprono un range abbastanza ampio tale da poter essere adattate e applicate in alcuni casi anche ad un livello più basso (ad esempio il *carbon emission* o l'*energy consumption*).

La tabella 2.5 alla pagina seguente fornisce una breve descrizione per ciascun livello di *scale* in corrispondenza del livello decisionale associato. Di seguito viene dettagliato il significato di ciascuno *scale* e della relative decisioni intraprese per ciascun livello, (Reich-Weiser et al., 2008, Cannata, 2011).

Tabella 2.5: Decision-making in manufacturing". Fonte: Cannata, 2011, rielaborato da Reich-Weiser et al., 2008.

Scale	Livello Decisionale	Descrizione
Supply Chain Scale	Strategico	l'intera supply chain di produzione, inclusi i diversi impianti produttivi e sistemi di comunicazione e di trasporto.
Factory Scale	Strategico	tutti gli impianti attivi in uno stabilimento, le risorse utilizzate, i macchinari.
Line Scale	Tattico	una famiglia di impianti produttivi raggruppati per produrre una specifica parte o assemblare.
Machine Tool Scale	Operativo	singoli impianti produttivi in un ambiente di produzione.

Le decisioni relative al *Machine Tool Scale* sono specifiche decisioni che riguardano uno o più macchine utensili, e tipicamente si tratta di miglioramenti tecnici, l'introduzione di nuove tecnologie, il retrofitting, ecc. Questo significa che gli indicatori che si riferiscono a questo livello dovrebbero evidenziare la funzionalità della macchina utensile, ad esempio il consumo energetico della macchina per parte prodotta.

Il *Line Scale* coinvolge un set di diverse macchine utensili e/o impianti che sono interconnessi in una rete orientate, ad esempio una linea o una cella di produzione definite a questo livello devono ragionevolmente evidenziare gli input e gli output dei sistemi, dando informazioni su come la linea viene condotta in efficienza e in efficacia, e considerando gli elementi ad essa appartenenti come i diversi macchinari e gli impianti,

Al *Factory Scale* vanno associate quel set di misure in grado di cogliere le performance di tutto lo stabilimento nel suo complesso sotto diverse prospettive.

Tuttavia, per specificare gli attributi attraverso cui articolare la dimensione *scale*, si ritiene più opportuno utilizzare uno standard apposito che descriva il layout fisico di uno stabilimento. A tal proposito si utilizza l'*Equipment Hierarchy Model* dello standard ISA<sup>19</sup>-95.

Si riporta dunque una breve descrizione dello standard e delle parti interessate all'applicazione dello standard all'interno della revisione bibliografica. Esso verrà successivamente utilizzato nel capitolo 4 all'interno progettazione del PMS .

L'ANSI/ISA-95, o semplicemente ISA-95, è uno standard internazionale finalizzato allo sviluppo di un'interfaccia automatica tra l'impresa e i sistemi di controllo. Gli scopi principali che lo standard si prepongono sono:

<sup>19</sup> ISA è l'acronimo di International Society of Automation. Sito web: <http://www.isa.org/>

1. definire in dettaglio un modello astratto dell'impresa, incluse le funzioni di controllo della produzione e le funzioni di business, oltre che lo scambio di informazioni tra le due funzioni;
2. stabilire una terminologia comune per la descrizione e la comprensione dell'impresa, incluse le funzioni di controllo della produzione e le funzioni di business, oltre che lo scambio di informazioni tra le due funzioni;
3. definire lo scambio elettronico delle informazioni tra le funzioni di controllo della produzione e le altre funzioni dell'impresa inclusi i modelli di dati.

La scelta del riferimento all'ISA-95 per la dimensione *scale* è giustificata dunque, oltre che dal punto 1 e dal punto 2 dell'elenco, dal fatto che esso sia stato pensato per tutti i tipi di industry all'interno del Manufacturing e tutti i tipi di processi produttivi come processi a lotti, continui e ripetitivi.

All'interno dello standard, la rappresentazione del layout fisico è effettuata attraverso l'*Equipment Hierarchy Model* (Figura 2.13) definito in primis all'interno dell'IEC 62264-1 (IEC, 2003), e successivamente esteso dall'ISA (ANSI/ISA-95.00.01-2010).

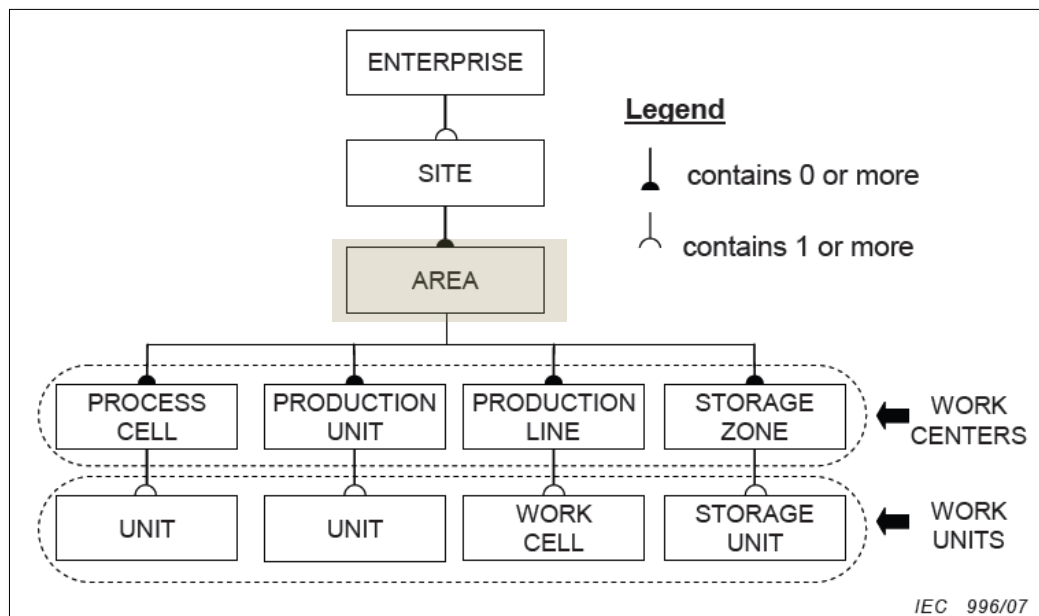


Figura 2.13: Equipment Model. Fonte: ISA-95, from IEC 62264-1.

Come si evince dalla figura, l'organizzazione in gruppi al livello più basso è combinata a quelli di livello più alto all'interno della gerarchia. In alcuni casi, un raggruppamento all'interno di un livello può essere incorporato all'interno di un altro gruppo presente allo stesso livello, secondo una struttura ricorsiva. Il modello può essere collassato o espanso a seconda delle specifiche applicazioni. Ad ogni modo, deve esserci almeno un sito all'interno di un'impresa, almeno un work center in un'area (o sito, se l'area è collassata in esso) e almeno una work unit all'interno di un work center.

Enterprise, site e area sono termini pressoché generici e chiaramente associabili rispettivamente all'azienda nel suo complesso con i siti produttivi che la costituiscono, il sito produttivo, e i singoli aree/edifici distinti che compongono un sito produttivo. Lo standard definisce piuttosto, in maniera specifica, il *work center* e *work unit*, categorie che racchiudono entità indicate con termini differenti (si veda Figura 2.13 2.13 ) in caso si consideri la produzione continua, batch, discreta o ripetitiva, e per gli impianti, lo stoccaggio e il movimento dei materiali.

Per quanto concerne il *work center*, esso comprende entità quali *process cell*, *production unit*, *production line*, *storage zone* o qualsiasi altro elemento equivalente. Un *work center* è un qualsiasi elemento del modello gerarchico di impianto ad essere incluso in un'area. Si fa riferimento al *work center* quando, ad esempio, il tipo di elemento specifico di impianto non è rilevante allo scopo della discussione.

La *work unit* è un qualsiasi elemento del modello gerarchico di impianto ad essere incluso all'interno di un *work center*. Le *work unit* sono tipicamente gli elementi maggiormente programmabili dalle funzioni del Livello 3 dello standard (l'allegato 4

*ISA-95 Levels: Activity Model* riporta i diversi livelli considerati dall'ISA-95).

Anche se non conforme –per quanto concerne la terminologia- all'Equipment Model dell'ISA-95, la classificazione fornita da Reich-Weiser et al. (2008) risulta ad ogni modo valida in quanto allineabile all' Equipment Model (per la *work unit* si ipotizza un allineamento con il *Machine Tool Scale*, per il *work center* si ipotizza un allineamento con il *Line Scale*, e il *site* con il *Factory Scale*).

In Figura 2.13 il livello Area è ingrigito, ovvero non considerato come attributo della dimensione di classificazione “scale” in quanto risulterebbe non significativo e ridondante rispetto ai tre livelli già individuati all'interno dell'Equipment model.

In conclusione, la Tabella 2.6 riassume le tre dimensioni di classificazione della mappatura dello stato dell'arte dei KPI di EE.

Tabella 2.6: Dimensioni adottate per la classificazione dello stato dell'arte dei KPI di EE.

Livello di aggregazione	Livello Decisionale <sup>20</sup>	Scale
Dati aggregati	Strategico	Enterprise Site
Dati disaggregati	Tattico	Work Center
Process/Appliance	Operativo	Work Unit

Poiché la letteratura, come si è potuto constatare precedentemente, ha evidenziato relazione biunivoca esistente tra il livello decisionale e lo *scale*, nelle diverse tabelle che costituiscono la review degli specifici KPI di EE verranno riportate per comodità le sole dimensioni di livello di aggregazione e *scale*, con la consapevolezza che il *site scale* ed *enterprise scale* possano essere considerati in via approssimativa per decisioni strategiche, il *Work Center Scale* per decisioni tattiche, e il *Work Unit Scale* per decisioni operative. In pratica è possibile per semplicità fare un “merge” della seconda e terza dimensione indicata nella tabella 2.6, mentre per quanto concerne il livello di aggregazione dei dati, dato il gran numero di indicatori esistenti e le differenti misure con le quali sono costruiti, è risultato opportuno specificare all’interno delle tabelle delle review dei KPI il livello di aggregazione dei dati impiegati nell’indicatore.

Le dimensioni di classificazione, oltre ad essere funzionali alla classificazione dello stato dell’arte dei KPI di EE, contribuiscono a formulare la definizione di KPI di EE per questa trattazione (poiché la letteratura non fornisce una definizione “ufficiale” in merito”).

Per KPI di EE si intende un indicatore calcolato attraverso dati storici relativi all’energia e alla produzione o dati raccolti in tempo reale (in funzione del loro livello di aggregazione) usati per il calcolo e/o la predizione di misure relative ad obiettivi di EE da uno *scale Work Unit* ad uno *scale Enterprise* .

<sup>20</sup> In virtù della possibilità di eseguire un *merge* della seconda e terza dimensione di classificazione (livello decisionale e *scale*, rispettivamente), la colonna, in tabella 2.6, del livello decisionale è stata riportata in grigio chiaro, lasciando in nero le dimensioni effettivamente considerate.



### **2.2.2: Stato dell'arte dei Key Performance Indicator di efficienza energetica**

Il lavoro di classificazione di Patterson risale al 1997, e pur avendo grande valenza applicativa, non considera ovviamente tutte le tipologie di indicatori realizzati fino a questo momento. Sulla base della revisione bibliografica eseguita si può affermare l'aggiunta di ulteriori due categorie, sempre aventi come criterio le grandezze fisiche coinvolte nella costruzione degli indicatori: indicatori economico-fisici, di eco-efficiency. In conclusione, gli indicatori di EE appartengono alle seguenti tipologie:

- 1) *termodinamici*;
- 2) *fisico-termodinamici*;
- 3) *economico-termodinamici*;
- 4) *economico-fisici*;
- 5) *economici*;
- 6) *eco-efficiency*

La descrizione di ciascuna delle tipologie, e dei relativi KPI ad esse appartenenti, segue la logica seguente:

- Prima della descrizione di ciascuna tipologia di indicatori (termodinamici, fisico-termodinamici, ecc) un box introduttivo riporta gli indicatori generici o specifici analizzati in dettaglio per la tipologia in questione, eventualmente suddivisi in indicatori relativi e assoluti;
- Si introduce sommariamente la tipologia di indicatore analizzata, riportandone le applicazioni, le potenzialità e i limiti. Si illustrano gli indicatori generali rappresentativi della tipologia (inseriti nel box);
- Nel caso si tratti di indicatori specifici di una certa rilevanza/utilità/innovatività, essi verranno analizzati nel dettaglio (indicatori specifici inseriti nel box) altrimenti verranno direttamente contemplati nelle diverse tabelle che riportano una "summa" dei KPI revisionati per ciascuna tipologia;
- Ciascuna tabella è relativa ad una sola tipologia di indicatori di EE, e dettaglia gli indicatori secondo le dimensioni di analisi definite nella sezione 2.3.1;
- In alcuni casi, oltre agli indicatori generali presenti in ciascun box può essere presente una tipologia associata al nome "altro": essa contiene tutti quegli indicatori per i quali non esiste una perfetta corrispondenza (o allineamento) con le categorie generali ricavate dalla letteratura, ma che

ad ogni modo appartengono, in virtù delle grandezze presenti nella formula di calcolo dell'indicatore, alla tipologia esaminata.

1) Indicatori termodinamici

Indicatori termodinamici relativi di tipo generale analizzati:

- Efficienza Energetica Termodinamica o Efficienza Entalpica;
- Degree of Energy Efficiency.

Indicatori termodinamici relativi specifici analizzati:

- Energy Efficiency of Management.

Indicatori termodinamici assoluti di tipo generale analizzati:

- Total Energy Consumption.

Indicatori termodinamici assoluti specifici analizzati:

- EN3, EN4 (GRI).
- Electric Energy consumption for remaining months.

Altri indicatori termodinamici:

- Entity Energy Contribution.

Gli indicatori di EE termodinamici sono indicatori di EE che dipendono interamente dalle misure derivanti dalla scienza della termodinamica. Alcuni di essi sono rappresentati attraverso rapporti piuttosto semplici, mentre invece altri consistono in misure più sofisticate che rapportano l'utilizzo effettivo dell'energia con le condizioni di processo *ideale*.

Cominciando la trattazione degli indicatori termodinamici relativi di tipo generale, si riporta in primis l'indicatore più comune di questa categoria noto come

Efficienza Energetica Termodinamica o Efficienza Entalpica

Quella che Patterson chiama "first-law energy efficiency" si riferisce all'efficienza termica o entalpica, poiché essa misura l'efficienza in termini di "contenuto di calore" degli input e degli output di un processo, e il contenuto di calore è misurato in termini di cambiamenti dei valori dell'entalpia ( $\Delta H$ ). Il rapporto di efficienza entalpica di un qualsiasi processo è perciò il valore  $\Delta H$  degli output utili del processo diviso per il valore  $\Delta H$  degli input di un processo, ovvero:

$$E_{\Delta H} = \frac{\Delta H_{out}}{\Delta H_{in}} \quad [\%] \quad (2.6)$$

dove:

$E_{\Delta H}$  = efficienza entalpica

$\Delta H_{out}$  = somma dell'energia utile in output da un processo

$\Delta H_{in}$  = somma dell'energia in input in un processo

A livello strettamente tecnologico l'EE si riferisce dunque ad un output di energia rapportato ad un input anch'esso energetico. Questa definizione è tipicamente usata per macchine e impianti: nel caso di un motore elettrico, l'EE è il rapporto tra l'output di tipo meccanico (ovvero il lavoro speso) e l'input elettrico. E' chiaro che le quantità devono essere espresse con le stesse unità di misura, ad esempio kWh nella giornata: conseguentemente il rapporto è adimensionale e solitamente espresso in percentuale. Questo approccio è impiegato in maniera estensiva negli impianti industriali per un ampio range di apparecchiature tra cui motori, pompe, compressori, forni e caldaie. E' molto importante che la misura sia riferita agli output utili: nel caso di una caldaia un'efficienza del 85% significa che l'85% del valore energetico del combustibile è stata convertita in calore utile (per cui la somma delle varie perdite ammonta al 15%). Le perdite, sommate all'energia utile, è uguale all'output totale, che è a sua volta uguale all'input totale: questo esempio, riportato dall'autore, aiuta a comprendere meglio come la "first-law energy efficiency" altro non sia che la prima legge della termodinamica, ovvero come l'energia in un processo di conversione non possa essere né creata e né distrutta.

Il *thermal energy efficiency of equipment* di Tanaka (2008) è del tutto equivalente all'indice precedente: l'autore riporta come esempio di efficienza energetica termica il caso del calcolo dell'EE di un motore, ottenuto dividendo la potenza in uscita (output utile) per l'input di elettricità.

Come sottolinea Patterson, una deficienza di questo tipo di indicatore è che non tiene conto della qualità dell'energia: non viene fatta distinzione tra fonti energetiche di alta qualità e bassa qualità, meno utili e produttive. Ad esempio per un unità di energia elettrica (alta qualità) si assume implicitamente che abbia la stessa utilità dell'energia solare (bassa qualità), per questo motivo se sia gli input che gli output di due processi hanno qualità differente non si può comparare in maniera significativa le relative efficienze energetiche.

### Degree of Energy Efficiency

Per quanto concerne il Degree of Energy Efficiency (DEE), ovvero il grado di EE, la revisione bibliografica restituisce differenti versioni, che mantengono comunque lo stesso principio di fondo, dato dal rapporto tra una quantità di energia in output e una quantità di energia in input. Molto spesso infatti il Degree of Energy Efficiency può essere inteso come un sinonimo di Efficienza Entalpica. Solitamente in letteratura ci si riferisce molto più spesso al DEE piuttosto che

all'Efficienza Entalpica<sup>21</sup>: per questo motivo il DEE è presente in letteratura in differenti sfaccettature, alcune delle quali sono ivi riportate.

Il DEE rappresenta il rendimento  $\mu$  di una macchina o equipment, e dato che quasi in tutti i processi di conversione dell'energia in altre forme di energia utile sussistono delle perdite di energia, il valore di  $\mu$  sarà minore (o al più uguale) ad 1. Irrek & Thomas (2006) definiscono il DEE come:

$$DEE = \frac{\text{Net energy}}{\text{Used primary energy}} \quad [\%] \quad (2.7)$$

dove per “energia netta” si intende quantità di energia che una utility elettrica richiede per poter soddisfare il servizio, incluse sia le esigenze totale e parziali dei consumatori disponibile ad essere utilizzata<sup>22</sup> (U.S. Energy Information Administration, 2010). Come si nota dalla formula di calcolo, questo indice si riferisce all'impiego di energia in termini aggregati, ovvero utilizza dati aggregati per la sua costruzione.

Müller et al. (2009) definiscono il DEE come:

$$DEE = \frac{\text{Usable output}}{\text{Supplied input}} = \frac{\text{Energetic benefit}}{\text{Energetic effort}} \quad [\%] \quad (2.8)$$

riferendolo a livello di processo, risorse e componenti, utilizzando dunque, a differenza del precedente, dati di tipo disaggregato. Il “benefit” di una macchina è l'output generato richiesto da uno specifico processo, che può essere di natura meccanica o termica. Il DEE è prevalentemente usato per stati stazionari, per cui risulta sconsigliato per analisi di lungo periodo, per i quali risulta più appropriato il grado di utilizzo, ovvero il *Degree of Utilization* (DU) (Schieferdecker et al., 2006) espresso dalla formula:

$$DU = \frac{\text{Energetic benefit related to Time}}{\text{Energetic effort related to Time}} \quad [\%] \quad (2.9)$$

Come si può notare dalla formula, l'indicatore considera le stesse variabili del DEE (e dunque è anche esso un indicatore costruito da dati disaggregati), con la differenza che esso si riferisce esplicitamente ad un periodo di tempo fissato.

<sup>21</sup> Data l'equivalenza informativa dei due indicatori “Efficienza Entalpica” e “DEE”, nella tabella 2.7 a pag. 68 farà riferimento al solo “DEE” come tipologia generale di riferimento per gli indicatori specifici appartenenti a questa tipologia.

<sup>22</sup> Si rimanda all'allegato 1 a pag. per un 170 l'approfondimento sui diversi processi di conversione dell'energia da primaria a finale.

L'efficienza tiene conto dunque di differenti condizioni operative espresse attraverso misure temporali, come il downtime<sup>23</sup> e gli idle time<sup>24</sup>.

### Energy Efficiency of Management

Uno degli indicatori specifici facenti capo alla tipo di indicatori generali "DEE" che merita una trattazione approfondita in virtù degli obiettivi della trattazione, è il Energy Efficiency of Management (eem). Conoscendo, in tutto il suo tempo di funzionamento, gli stati di un'entità di un sistema produttivo (ad esempio una macchina utensile) definiti in relazione ai differenti tipi di consumo energetico, Cannata (2011) mostra come sviluppare un indicatore che valuti il contributo degli stati a valore aggiunto sul totale degli stati in cui l'entità si trova nel suo ciclo di lavoro, sulla falsariga di un'ottica di lean production.

Definendo gli stati a valore aggiunto come quegli stati in cui vi è un contributo diretto all'output finale dell'entità, si può supporre come l'energia e il tempo speso in corrispondenza di quegli stati fluisca direttamente nella realizzazione dell'output finale (Cannata, 2011). L'eem è un numero reale definito nell'intervallo da 0 a 1 ( $eem \in [0, 1]$ ), e calcolato nel modo seguente:

$$eem = \frac{E_{\text{valuable}}}{E_{\text{total}}} \quad [\%] \quad (2.10)$$

dove:

$E_{\text{valuable}}$  = quantità di energia spesa durante gli stati a valore aggiunto del sistema di produzione in un time frame definito. Per semplicità questo stato verrà indicato con il termine *working*, ovvero si sceglie di considerare come stato a valore aggiunto lo stato in cui la macchina sta effettivamente svolgendo delle lavorazioni sul pezzo;

$E_{\text{total}}$  = quantità totale di energia spesa dal sistema di produzione nello stesso time frame.

Quindi:

$$eem = \frac{E_{\text{working}}}{E_{\text{total}}} \quad [\%] \quad (2.11)$$

<sup>23</sup> Il downtime è il tempo di indisponibilità, che è il tempo che intercorre tra l'istante di rilevazione del guasto all'istante della rimessa in servizio nel caso di politica di manutenzione a guasto, mentre è il tempo che intercorre tra l'istante di inizio intervento e istante di rimessa in servizio nel caso di politica di manutenzione preventiva. Fonte: Furlanetto, Garetti, Macchi: Principi generali di gestione della manutenzione.

<sup>24</sup> Il tempo di idle fa riferimento ad un particolare stato energetico della risorsa produttiva chiamato stato di idle, ovvero lo stato per la quale la macchina è accesa e perfettamente in grado di compiere la lavorazione ma è in attesa del successivo pezzo da lavorare.

Esso è un indicatore di EE dal momento che più alto è il suo valore, più efficientemente le risorse sono utilizzate, più energia è direttamente allocata all'output finale del sistema produttivo. Il valore 0 indica una cattiva gestione delle operations, in termini di EE, mentre 1 indica una buona gestione a livello shop floor. Tuttavia, come sottolinea l'autore, anche un valore dell'indicatore sia prossimo al valore 1 ciò non preclude possibili ulteriori miglioramenti nell'EE, dato che oltre alla leva di management esiste anche una leva tecnologica che costituisce uno dei driver di EE, attuabile ad esempio attraverso miglioramenti tecnologici adottati in produzione. Esso è annoverato tra gli indicatori termodinamici, dal momento che sia il numeratore che il denominatore misurano valori e processi energetici, ed è annoverato tra gli indicatori specifici facenti capo al DEE in quanto è possibile considerare con un certa approssimazione (ovvero a meno di perdite che naturalmente avvengono nei processi di trasformazione) il numeratore  $E_{working}$  come energia di output utile, mentre il denominatore  $E_{total}$  come input energetico.

L'indicatore può essere suddiviso in due indici: che evidenziano lo spreco specifico dovuto alle operazioni indirettamente a valore aggiunto ( $eem_{ind.valuable}$ ) e non a valore aggiunto ( $eem_{worthless}$ ), rispettivamente espressi dai seguenti rapporti.

$$eem_{ind.valuable} = \frac{E_{valuable}}{E_{valuable} + E_{ind.valuable}} \quad [\%] \quad (2.12)$$

$$eem_{worthless} = \frac{E_{valuable} + E_{ind.valuable}}{E_{total}} \quad [\%] \quad (2.13)$$

Bisogna dunque capire cosa si intende per  $E_{ind.valuable}$  e  $E_{worthless}$ .

Gli stati in cui l'entità del sistema produttivo che possono essere considerati indirettamente a valore aggiunto sono quelli che contribuiscono indirettamente all'output finale, ovvero sono stati necessari affinché si possa realizzare il prodotto finale, ma non tutto il tempo e l'energia relativa ad essi può essere allocata in maniera diretta a ciascun prodotto. Gli stati non a valore aggiunto sono stati che non contribuiscono all'output finale, cosicché il tempo e l'energia relativa a questi stati non entra a far parte delle componenti del flusso dei prodotti finali.

Cannata (2011) considera come stati indirettamente a valore aggiunto, nel caso di una macchina utensile, lo stato di attivazione della macchina e lo stato di set up, mentre considera come stato non a valore aggiunto lo stato di idle (considerare lo stato di non funzionamento è trascurabile in tal senso). Ciò consente di riformulare i due indici.

L' $eem_{ind.valuable}$ , indicato dal seguente rapporto:

$$eem_{ind.valuable} = \frac{E_{working}}{E_{working} + E_{warm\ up+set\ up}} \quad [\%] \quad (2.14)$$

indica che un più basso valore dell'indicatore è associate ad un più alto spreco di energia dovuto a stati indirettamente a valore aggiunto.

L'  $eem_{worthless}$  viene invece espresso attraverso il rapporto:

$$eem_{worthless} = \frac{E_{working} + E_{warm\ up+set\ up}}{E_{total}} \quad [\%] \quad (2.15)$$

e analogamente al caso precedente, un più basso valore dell'indicatore è associato ad un più alto spreco di energia dovuto agli stati non a valore aggiunto. E' evidente dunque che l'  $eem$  è ottenuto dal prodotto dei due indici precedenti, ovvero:

$$eem = eem_{ind.valuable} \times eem_{worthless} \quad [\%] \quad (2.16)$$

E' chiaro che il significato e il valore di questi indicatori, come sottolineato dallo stesso autore, dipende strettamente dalla metodologia adottata nell'associare gli eventi che occorrono nel sistema produttivo a ciascuno dei tre stati. Questo processo di associazione dipende a sua volta sia dallo specifico sistema valutato che dalla definizione degli obiettivi specifici dell'azienda. Ad esempio una macchina in stato di guasto in attesa di essere riparata può essere considerata in uno stato non a valore aggiunto (worthless), mentre lo stato di una macchina relativo ad un intervento di manutenzione in corso può essere considerata come stato indirettamente a valore aggiunto (ind. valuable).

La costruzione di questo tipo di indicatori che rappresentano l'EE of Management riveste un ruolo essenziale anche per questa trattazione, dato che mettono in luce l'esistenza di differenti richieste di potenza per ciascuno degli stati in cui un'entità del sistema viene a trovarsi.

Cannata specifica che l'indicatore può essere in teoria adoperato a livello machine tool, line e factory, ma è consigliato un suo utilizzo a livello machine tool, dato che salendo ai livelli superiori sale la difficoltà di valutazione degli stati e la relativa allocazione dei consumi energetici.

### Total Energy Consumption

Per quanto concerne gli indicatori generici di tipo assoluto si riporta una breve descrizione del *Total Energy Consumption*, indicato talvolta come *Energy Use* o *Absolute Amount of Energy Consumption* (Tanaka, 2008).

Hendrik & Verfaillie (2000) definiscono questa misura come l'energia acquistata o ottenuta (ad esempio dal carbone, o gas naturale) diminuita dall'energia venduta

ad altri attori esterni per i loro utilizzi (elettricità o vapore). A differenza dell'applicazione delle misure di efficienza termiche, questo indicatore può essere usato per valutare e comparare le performance energetiche di un set di oggetti più ampio: processi, impianti, aziende, e anche Paesi (Tanaka, 2008). E' chiaro che, essendo una misura assoluta, essa perde la sua rilevanza, dal punto di vista dell'EE, se non accompagnata da una misura che indichi l'output di produzione.

Per quanto concerne gli indicatori specifici appartenenti a questa categoria, il GRI ha sviluppato due indicatori appartenenti a questa tipologia: l'EN3 e l'EN4.

L'EN3 è definito come *Direct energy consumption by primary energy source* (GRI, 2006). Questo indicatore misura in Joule il consumo di fonti di energia primaria per fornire un'organizzazione di energia intermedia come elettricità, riscaldamento, raffreddamento, ecc.

L'EN4: *Indirect energy consumption by primary source*, misura in Joule l'energia richiesta per produrre e distribuire l'elettricità acquistata e qualsiasi altro prodotto di energia intermedia che implichi un significativo consumo di energia a monte dei confini dell'organizzazione (GRI, 2006).

Per cui, la somma di EN3 e EN4 è un equivalente degli indicatori di Total Energy Consumption.

Tra gli indicatori specifici di tipo assoluto del tipo "Total Energy Consumption" è risultata opportuna, per la sua attinenza alla descrizione dell' *Electric Energy consumption for remaining months*.

#### Electric Energy consumption for remaining months

L' *Electric Energy consumption for remaining months* (KAP, 2011) è un indicatore di performance energetica che può essere usato per avere un riferimento in termini di benchmark del consumo di energia elettrica che un impianto dovrebbe avere nei mesi rimanenti dell'anno, utilizzando i dati di consumo di energia elettrica dei mesi precedenti e l'obiettivo di consumo energetico per quell'anno. Sulla base dei dati storici l'indicatore calcola il miglior valore di consumo energetico per i mesi rimanenti dell'anno, posto che l'obiettivo di consumo di energia elettrica per l'anno corrente può essere fissato dagli Energy Regulators (ad esempio il CEER<sup>25</sup>), dalle politiche di governo o dall'azienda stessa.

---

<sup>25</sup> CEER è l'acronimo di Council of European Energy Regulators, che riunisce in un'associazione no-profit la voce dei differenti enti regolatori in EU, sia per quanto riguarda i consumi di energia elettrica che di gas. L'obiettivo è quello di facilitare la creazione di un mercato di energia in Europa unico, competitivo, sostenibile nell'interesse pubblico.

Fonte: [http://www.energy-regulators.eu/portal/page/portal/EER\\_HOME](http://www.energy-regulators.eu/portal/page/portal/EER_HOME)



Esso è calcolato come:

$$E_m = \frac{E_y - \sum_{i=1}^k E_{mi}}{12 - k} \quad [\text{kWh}] \quad (2.17)$$

dove:

$E_m$  = Consumo di energia elettrica per i mesi dell'anno rimanenti (Electric Energy consumption for remaining months) [kWh];

$E_y$  = Obiettivo di consumo energetico per l'anno corrente [kWh];

$E_{mi}$  = Consumo di energia elettrica del mese  $i$ , ( $i = 0, 1, 2, \dots, 11$ ) [kWh];

$k$  = numero di mesi precedenti rispetto a quello di valutazione.

### Entity Energy Contribution

A metà strada tra gli indicatori termodinamici relative e quelli assoluti si colloca l' *Entity Energy Contribution (eec)*; indicatore riferito al Machine tool scale e definito dal rapporto:

$$eec_i = \frac{E_{total} (i)}{E_{total} (system)} \quad [\%] \quad (2.18)$$

Esso, per costruzione, è un indicatore relativo, ma non appartiene a nessuna delle categorie di indicatori termodinamici relative illustrate (Efficienza Energetica Termoninamica, DEE, ecc), poiché è un indicatore "ad hoc" costruito sulla base di misure di consumo energetico totale finalizzato a valutare il contributo del consumo energetico di un'entità ( $i$ ) sul consumo energetico dell'intero sistema. In questo modo si possono individuare le entità maggiormente *energy-consuming* di un sistema relativamente ad una finestra temporale fissata.

L'obiettivo della Tabella 2.7, così come quello delle successive, è quello di associare a ciascuna delle tipologie di indicatori (termodinamici, economici, ecc, indicati nella prima colonna) i KPIs attualmente esistenti, indicati nella terza colonna, e preceduti dalla relativa reference in letteratura (per comodità tutti gli indicatori ricavati dalla fonte <http://kpilibrary.com> saranno contrassegnati dalla lettera "L") al fine di ottenere una revisione bibliografica dei KPIs di EE maggiormente dettagliata rispetto a quelle disponibili, le quali riportano o soltanto il "tipo di indicatore" o i singoli KPIs per uno specifico caso d'uso. Proseguendo con la descrizione riguardante la progettazione delle singole tabelle, esse riportano in quarta colonna il calcolo dell'indicatore e/o la sua descrizione, in quinta l'unità di misura, in sesta e settima le due dimensioni di analisi (trattate precedentemente nel paragrafo 2.2.1: *Dimensioni di classificazione dello stato dell'arte dei Key Performance Indicator di*) e nell'ultima l'attributo dell'indicatore in

letteratura definito come “objective”, che indica l’obiettivo di massimizzazione o minimizzazione del valore dell’indicatore.

Tabella 2.7: KPI termodinamici.

KPI termodinamico generico	Reference	KPI specifico (simbolo)	Descrizione/Calcolo	Unità di mis.	Livello aggr.	Scale	Obj
Degree of Energy Efficiency	Tanaka (2008)	Thermal Energy Efficiency of Equipment ( $\mu$ )	$\frac{\text{Energy output}}{\text{Energy input}}$ per una tecnologia end-use e tecnologia di conversione dell’energia.	%	Disaggregato	Site	max
	Irrek & Thomas (2008)	DEE <sub>1</sub>	$\frac{\text{Net energy}}{\text{Used primary energy}}$	%	Aggregato	Site	max
	Müller et al. (2009)	DEE <sub>2</sub>	$\frac{\text{Energetic benefit}}{\text{Energetic effort}}$	%	Disaggregato	W. Unit	max
	L	Specific energy usage of a transformation process	$\frac{\text{Consumed energy}}{\text{Supplied energy}}$	%	Disaggregato Process/Appliance <sup>26</sup>	All <sup>27</sup>	max
	Cannata (2011)	Energy Efficiency of Management (eem)	$\frac{\text{Eworking}}{\text{Etotal}}$	%	Disaggregato Process/Appliance	W. Unit	max
Total Energy Consumption	L	Total On Site Energy	Energia totale creata nel sito produttivo in un certo periodo (mese, trimestre, anno, ecc). Questa energia, creata) nei processi di manufacturing, può essere potenzialmente riutilizzata per altri processi.	[J]	Disaggregato	W. Center Site	min
	GRI (2006)	Direct energy consumption by primary energy source (EN3)	Consumo di fonti di energia primaria per fornire un’organizzazione di energia intermedia come elettricità, riscaldamento, raffreddamento, ecc.	[J]	Disaggregato	Site	min
	GRI	Indirect energy	Energia richiesta	[J]	Disaggregato	Site	min

<sup>26</sup> Il fatto che il livello di aggregazione dei dati dell’indicatore possa essere aggregato e disaggregato, o disaggregato e process/appliance dipende dalle possibilità attraverso cui i dati dell’ indicatore possono essere raccolti. In questo caso l’indicatore può essere calcolato attraverso dati ottenute da stime o indagini, ma anche da specifiche misurazioni.

<sup>27</sup> “All” indica la possibilità di uno scale associabile potenzialmente a tutti e tre i livelli dello stabilimento: W.Unit, W.Center, Site.

	(2006)	consumption by primary energy source (EN4)	per produrre e distribuire l'elettricità acquistata e qualsiasi altro prodotto di energia intermedia che implichi un significativo consumo di energia a monte dei confini dell'organizzazione				
	L	Idle equipment energy consumption	Energia spesa dalle macchine in stato di idle	[J]	Process/ Appliance	W. Unit	min
	KAP (2011)	Electric Energy consumption for remaining months ( $E_m$ )	$\frac{E_y - \sum_{i=1}^k E_{mi}}{12 - k}$	[kWh]	Disaggregato	Site	-
Altro	Cannata (2011)	Electric Energy Contribution ( $ee_c$ )	$\frac{E_{total} (i)}{E_{total} (system)}$	%	Disaggregato Process/ Appliance	All	-
	Patterson (1996)	Second-law energy efficiency (ideal limits) ( $\rho$ )	$\frac{E_{\Delta H actual}}{E_{\Delta H ideal}}$  p misura la vicinanza del processo di conversione dell'energia reale all'efficienza ideale (in tal caso p assume valore pari ad 1). Applicabile in un ampio range di processi (es chimico, refrigerazione, condizionamento).	%	Disaggregato	W. Unit	max
	VDI-Richtlinie4 661 (2003)	Harvest Factor (HF)	$\frac{Net energy}{KEA of Facility}$  Descrive la proporzione tra l'energia netta e l'energia usata per produrre l'energia generata dall'impianto. L'HF è un indicatore per valutare la conversione di energia negli impianti.	%	Disaggregato Process/ Appliance	Site	max
	L	Energy transmission and distribution losses percentage	Percentuale di perdita (sul totale) delle trasmissioni e distribuzioni di energia nei diversi processi.	%	Disaggregato Process/ Appliance	W. Center Site	min
	Bonneschky (2005)	Potential energy consumption out of recovered energy	Energia recuperata nuovamente e potenzialmente spendibile all'interno	[J]	Process/ Appliance	All	max

			di un processo				
	Bonneschky (2005)	Real energy consumption out of recovered energy	Energia recuperata nuovamente spesa all'interno di un processo	[J]	Process/ Appliance	All	max

2) Indicatori fisico-termodinamici:

Indicatori fisico-termodinamici relativi di tipo generale analizzati:

- Energy Efficiency;
- Specific Energy Consumption.

Indicatori fisico-termodinamici relativi specifici analizzati:

- Specific Cutting Energy;
- Energy Performance Index.

E' facile notare come gli indicatori di EE termodinamici tradizionali non siano orientati in maniera adeguata agli utilizzatori di tali indicatori, in quanto considerano al denominatore (ovvero nell'output), così come al numeratore (input), misure anche esse termodinamiche. Per questo motivo gli *energy analyst* hanno in passato sviluppato indicatori ibridi che misurino l'output in termini di unità fisiche e non più termodinamiche: in particolare, queste unità fisiche sono scelte specificamente per riflettere la destinazione d'uso finale che i clienti richiedono (Patterson, 1996). Ad esempio, in un processo produttivo il cliente del processo potrebbe essere interessato a conoscere come la performance energetica sia rapportata all'output in prodotti finiti, e di conseguenza le unità di misura dell'indicatore di EE per quel processo produttivo possono essere rappresentate in [Joules/tonne of finished product]: l'indicatore di EE fisico-termodinamico rappresenta dunque l'energia consumata per prodotto finito (Patterson, 1996) o per processo produttivo analizzato (Van Gorp, 2005).

Phylipsen, Blok, & Worrell (1997) descrivono questo tipo di indicatori come indicatori fisici che calcolano il consumo specifico di energia relativo ad una misura fisica di produzione, come ad esempio le tonnellate di prodotto. Il vantaggio di questo tipo di indicatori risiede nell'esistenza di una relazione diretta tra l'indicatore stesso e la tecnologia di EE. Ad esempio, miglioramenti nelle tecnologie sono indicati in qualità di saving nel consumo energetico specifico, e si palesano in un indicatore che mostra un più basso energy requirement specifico per tonnellata di output.

Il più comune, e celebre, indicatore fisico termodinamico prende il nome di

Energy Efficiency

$$EE = \frac{\text{Useful output of a process}}{\text{Energy input into a process}} \left[ \frac{\text{units}}{\text{J}} \right] \quad (2.19)$$

Indicatore definito da Patterson (1996) e già ampiamente discusso in questa trattazione nel paragrafo

2.1.3: Efficienza **energetica** a pag. 30. Essendo un indicatore generico per costruzione, il numeratore e denominatore dipendono dallo scopo di analisi, e dal livello scelto per l'analisi<sup>28</sup>.

Il secondo indicatore più comune di questa tipologia, nonché uno tra gli indicatori di EE più conosciuti è

#### Specific Energy Consumption

$$SEC = \frac{\text{Energy Consumption}}{\text{Physical Unit of Production}} \left[ \frac{\text{J}}{\text{unit}} \right] \quad (2.20)$$

Noto anche con il nome di Unit Energy Consumption (UEC) o Physical Energy Intensity (PEI), storicamente presentato in letteratura da Phylipsen, Blok, & Worrell (1997) per rendere possibile e migliorare la comparabilità delle analisi di EE. Come si evince dalla formula di calcolo dello Specific Energy Consumption (SEC), esso corrisponde (a parità di considerazione del tipo di consumo energetico e tipo di unità fisiche o processo) al reciproco dell'indicatore di EE analizzato precedentemente. Nonostante i due indicatori abbiano lo stesso contenuto informativo, il SEC sembra essere più efficace –e conseguentemente più utilizzato- in qualità di indicatore di performance (si veda Phylipsen, Blok, & Worrell, 1997; Prindle, 2010; Tanaka, 2008).

Così come l'EE, il SEC è un indicatore che, per costruzione, è estremamente flessibile in termini di possibilità di calcolo. Mentre il denominatore del SEC dipende dal prodotto finito, o WIP, o servizio al quale l'analisi è rivolta, il numeratore può misurare il consumo energetico in diversi modi, ad esempio la domanda di energia primaria, energia netta disponibile, energia acquistata, energia finale, o energia utile.

L'energia acquistata (in ingresso dai fornitori) è spesso utilizzata nelle analisi di EE, ma in alcuni casi, specie laddove l'energia primaria in ingresso venga estratta direttamente nella stessa industria (ad esempio il legname nell'industria della carte), e –come spesso accade- venga esportata ad altri settori, non può essere considerata come la misura dell'energia totale consumata all'interno di un settore. Per questo motivo Phylipsen, et al. (1996), ed altri autori convergono

---

<sup>28</sup> Per queste categorie di indicatori lo scale in viene indicato come "All", data la possibilità di poter essere riferiti ad uno scale qualsiasi che guardi il singolo processo oppure l'intera filiera di realizzazione di un prodotto, a meno di indicatori specificamente progettati per un certo scopo di analisi.

nell'utilizzo dell'energia netta disponibile (*net available energy*) ovvero l'energia effettivamente disponibile all'utenza, incluse sia l'energia netta acquistata e l'energia generata in proprio, come numeratore preferibile.

lo Specific Cutting Energy (SCE), essendo l'industry di riferimento quella del Manufacturing, nella quale i processi di taglio piuttosto frequenti e quindi potenzialmente coinvolti in obiettivi di monitoraggio del consumo energetico.

### Specific Cutting Energy

Lo Specific Cutting Energy, ovvero l'energia specifica di taglio, è un indicatore utilizzato per valutare le prestazioni energetiche di un processo di asportazione. Introdotto per la prima volta da Sarwar (1987) e utilizzato/rielaborato in numerose trattazioni successive, lo SCE quantifica l'efficienza del processo di taglio. Esso è definito dall'autore attraverso il seguente rapporto:

$$SCE = \frac{E_m}{V_{material}} \left[ \frac{J}{mm^3} \right] \quad (2.21)$$

dove:

$E_m$  = Machining energy

$V_{material}$  = Volume of material removed

Così come tutti gli indicatori specifici facenti capo al SEC, lo SCE possa apportare un contenuto informativo diverso a seconda del tipo di energia che si sceglie di rappresentare al numeratore. Ad esempio, lo SCE appena discusso rappresenta l'efficienza di attività esclusivamente legate al machining. In alternativa, nel caso si voglia valutare l'efficienza dell'intero processo, si può calcolare lo SCE attraverso il rapporto:

$$SCE = \frac{P}{MRR} \left[ \frac{J}{mm^3} \right] \quad (2.22)$$

dove:

P = potenza totale, ovvero potenza di attività sia "machining" che non machining  
MRR = Material Removal Rate, ovvero la velocità di asportazione volumetrica, la cui formula (Anderberg, 2012) è:

$$MRR = \frac{n}{1000} \times a_z \times z \times p \times ae = \frac{V}{tempo\ macchina} \left[ \frac{mm^3}{min} \right] \quad (2.23)$$

dove  $n$  è il numero di giri del mandrino,  $a_z$  è l'avanzamento al dente,  $z$  è la profondità di passata,  $p$  è il diametro della fresa,  $a_e$  è l'impegno della fresa e  $V$  il volume da asportare.

Il motivo per il quale questo indicatore è introdotto nella trattazione specifica degli indicatori del "tipo SEC" risiede non solo nella presenza rilevante dei processi di taglio nell'industry del Manufacturing, ma anche nella possibilità di poter visualizzare la numerosità dei fattori/parametri che impattano sull'EE delle macchine utensili o centri di lavoro: come si può intuire dalla modalità di calcolo del SCE, il contributo di questi fattori differisce notevolmente a seconda dei diversi processi di lavorazione (alesatura, foratura, fresatura, ecc.) e dei pezzi da processare (morfologia, materiale, ecc.).

### Energy Performance Index

E' interessante la descrizione dell'Energy Performance Index (EPI), un indicatore che, per unità di misura, può essere ricondotto alla tipologia di indicatori fisico-termodinamici, ma costruito attraverso tecniche statistiche di regressione lineare. Sviluppato dall'U.S. Environmental Protection Agency (EPA) attraverso il programma Energy Star® , l'EPI è un indicatore a livello di stabilimento, basato su un complesso modello statistico/parametrico, in modo tale da poter essere impiegato in un'ampia varietà di industry con l'obiettivo di abilitare un utilizzo dell'energia più efficiente attraverso il benchmarking, (Boyd, 2006) e (Boyd, Dutrow, & Tunnessen, 2008). L'indice è stato sviluppato specificamente per il settore dell'automotive, motivo per il quale esso è inserito all'interno di questa trattazione.

L'EPI indica l'uso specifico di energia di uno stabilimento, fornendone una misura in percentile che attribuisce un ranking al grado di EE: per la precisione esso fornisce la percentuale di inefficienza dello stabilimento confrontata attraverso i benchmark redatti da dati non pubblici del Census Bureau. L'energia rappresentata nell'indicatore include sia l'elettricità acquistata che quella generata all'interno, ma esclude le fonti rinnovabili. Oltretutto l'area totale presa in considerazione per lo stabilimento esclude il seminterrato e le aree di parcheggio.

Poiché "ispirato" al modello di regressione lineare, la formula parametrica di calcolo dell'indicatore è la seguente:

$$\frac{E}{Y_i} = f(X_i, Z_i; \beta) + \varepsilon_i$$

$$\varepsilon_i = u_i - v_i$$

(2.24)

dove:

E = energia utilizzata, che può essere elettrica, non elettrica o primaria, misurata in British thermal unit (BTU o Btu).

$Y_i$  = output misurato in unità fisiche di produzione o in valore totale dell'output (tipicamente in veicoli prodotti, essendo un indice pensato per l'automotive).

$X_i$  = vettore delle variabili sistematiche economiche

$Z_i$  = vettore dei fattori sistematici esterni

$\beta$  = vettore dei parametric da stimare

$v_i$  = termine classico di rumore bianco, con  $v \sim N(0, \sigma^2)$

$u_i$  = distribuito secondo una certa distribuzione, ad esempio gamma, esponenziale, normale. ( $\sigma_{u,v} = 0$ ).

La Tabella 2.8 illustra, secondo le modalità già descritte precedentemente, lo stato dell'arte dei KPI fisico-termodinamici.

Tabella 2.8: KPI fisico-termodinamici.

KPI fisico termodinamico generico	Reference	KPI specifico (simbolo)	Descrizione/Calcolo	Unità di mis.	Livello aggr.	Scale	Obj
SEC	Boyd,Dutrow, Tunnessen (2008) Chen, Bor, & Wu (2007) and others	Energy consumed per product	-	$[\frac{J}{unit}]$	Disaggregato	All	min
	VDI-Richtlinie4 661 (2003)	Cumulative process energy demand (KPA)	$\sum$ Energia primaria spesa in un processo per la realizzazione di un prodotto/servizio (incluso il trasporto)	$[\frac{toe}{out^{29}}$	Disaggregato	All	min
	L	Electrical Energy Efficiency ratio (EEER)	$\frac{Consumed\ electrical\ energy}{Tonnes\ of\ product}$	$[\frac{J}{tonnes}]$	Disaggregato Process/ Appliance	All	min
	Schieferdecker (2005)	Energy density (dE)	$\frac{Energy\ input \times \mu}{Output}$	$[\frac{J}{out}]$	Disaggregato Process/ Appliance	All	min
	ISO14.031 (1998)	Quantity of energy used per service or customer	-	$[\frac{J}{out}]$	Aggregato	All	min
	Sarwar (1987)	Specific Cutting Energy	$\frac{E_m}{V_{material}}$	$[\frac{J}{mm^3}]$	Process/ Appliance	W.Center W.Unit	min
		Energy Performance Index (EPI)	$f(X_i, Z_i; \beta) + \varepsilon_i$		Aggregato	Site	min

<sup>29</sup> "out" sta per "output", ed è inserito qualora la grandezza



	ITIA-CNR (2011) and others	Energy efficiency ( $\mu_{eff}$ )	$\frac{\text{Hourly production}}{\text{Total consumed energy}}$	$[\frac{\text{units}(h)}{J(h)}]$	Disaggregato Process/ Appliance	All	max
EE	<sup>30</sup> McKinsey	Energy productivity	$\frac{\text{Units of activity}}{\text{Energy used}}$ dove il numeratore può essere la produzione di acciaio, o il riscaldamento di un ambiente fino ad una certa temperatura.	$[\frac{\text{units}}{J}]$	Disaggregato Process/ Appliance	All	max

### 3) Indicatori economico-termodinamici

Indicatori economico-termodinamici (relativi) di tipo generale analizzati:

- o Energy Intensity.

Anche gli indicatori economico-termodinamici, così come gli indicatori fisico-termodinamici, sono indicatori ibridi, dove l'erogazione del servizio (output) del processo è misurato in termini di prezzi di mercato, mentre l'energia in input, così come negli indicatori termodinamici e in quelli fisico-termodinamici, è misurato in termini di unità di misura termodinamiche convenzionali. L'indicatore generico rappresentativo di tale tipologia è l'Energy Intensity (EI), descritto dal seguente rapporto (Spalding-Fecher, 2003), (Ang, 2006):

$$EI = \frac{\text{Energy consumption}}{\text{Economic value}} \left[ \frac{J}{\text{€}} \right] \quad (2.25)$$

e ampiamente trattato nel paragrafo

#### 2.1.3: *Efficienza energetica* a pag. 30.

Un esempio di EI nel settore industriale di un Paese è espresso come quantità di Joules per unità di GDP generato dal settore (Manufacturing, residenziale, trasporto, ecc.), dall'area, dal Paese o dal globo. Si tratta di un indicatore aggregato in quanto il consumo energetico rappresentato nell'indicatore è quello riportato dai bilanci energetici nazionali, solitamente misurato in terajoules (TJ,  $10^{12}$ J), petajoules (PJ,  $10^{15}$ J), o exajoules (EJ,  $10^{18}$ J). Esso indica dunque una relazione generale tra il consumo energetico e lo sviluppo economico, fornendo una base approssimativa che consente di proiettare il consumo energetico e i suoi impatti ambientali sulla crescita economica. Sulla base della formula di

<sup>30</sup> [www.mckinsey.com/mgi/publications/global\\_energy\\_demand/Energy\\_Productivity.asp](http://www.mckinsey.com/mgi/publications/global_energy_demand/Energy_Productivity.asp)

calcolo dell'EI, si può facilmente comprendere come alte intensità energetiche corrispondano ad alti prezzi/costi per convertire l'energia in GDP, e viceversa.

In alternativa, è anche possibile utilizzare l'Energy Productivity Ratio, una sorta di produttività economica-energetica ottenuta dal reciproco dell'indicatore di EI; più è alto il GDP per unità di energia consumata, più è alta la produttività del Paese o del settore in relazione alla risorsa "energia" (Patterson, 1996).

Poiché l'indicatore di EI dipende fortemente sia dalla struttura dell'economia che dalle effettive intensità energetiche dei settori e attività ai quali si riferisce, è molto difficile contestualizzarne le variazioni dei valori nel tempo, in quanto esse possono essere imputabili sia a cambiamenti strutturali del settore che a cambiamenti delle intensità energetiche di settore<sup>31</sup>. All'interno dell'EI confluiscono innumerevoli fattori quali gli standard di vita, la situazione politica, le condizioni climatiche, le fonti energetiche accessibili, ecc.; per questo motivo esso non può essere utilizzato per applicazioni orientate a monitorare l'EE "tecnico-ingegneristica" e nell'ambito del policy making in temi di sostenibilità. A tal proposito sono stati proposti in letteratura numerosi metodi di decomposizione dell'indicatore di EI al fine di riuscire ad apprezzare con una buona approssimazione il contributo dei suoi fattori, tipicamente suddivisi in strutturali, di intensità e di attività.: tra i più celebri il metodo Laspeyres, ideato dall'economista tedesco Etienne Laspeyres, utilizzato per misurare la variazione nei volumi o nei prezzi di determinati aggregati, e il metodo Divisia (Farla, Blok, & Schipper, 1997).

La Tabella 2.9 riporta i KPI economico-termodinamici attualmente esistenti.

Tabella 2.9: KPI economico-termodinamici

KPI economico termodinamico generico	Reference	KPI specifico (simbolo)	Descrizione/Calcolo	Unità di mis.	Livello aggr.	Scale	Obj
EI	Schieferdecker (2006)	Economical energy efficiency	$\frac{\text{Total energy used}}{\text{Total turnover}}$	$\left[\frac{\text{J}}{\text{€}}\right]$	Aggregato	Enterprise Site	min
	L	Energy carrier Intensity	$\frac{\text{Energy carrier input}}{\text{Turnover}}$	$\left[\frac{\text{J}}{\text{€}}\right]$	Aggregato	Enterprise Site	min

#### 4) Indicatori economico-fisici

Indicatori economico-fisici (relativi) di tipo generale analizzati:

- Energy Cost.

A differenza degli indicatori fisici termodinamici, gli indicatori economici fisici associano alla quantità di energia consumata il relativo valore monetario.

<sup>31</sup> Fonte: <http://www.un.org/esa/sustdev/natlinfo/indicators/isdms2001/isd-ms2001economicB.htm>

Tipicamente questo tipo di indicatore viene utilizzato nel cost accounting. L'indicatore generico rappresentativo di questa tipologia è l'energy cost (Prindle, 2010)

$$Energy\ cost = \frac{Cost\ of\ energy\ consumption}{Production\ volume\ or\ space\ dimension} \left[ \frac{\text{€}}{\text{unit or m}^2} \right] \quad (2.26)$$

In letteratura sono poche le applicazioni di questo tipo di indicatori, giacché si preferisce utilizzare le informazioni di costo del consumo energetico in rapporti che esprimano il contributo del costo delle risorse energetiche su output che siano anch'essi valorizzati in termini monetari, ad esempio sui costi totali dell'organizzazione, o sulle vendite. Questi rapporti fanno capo alla categoria di indicatori economici.

La Tabella 2.10 riporta i KPI economico-fisici revisionati.

Tabella 2.10: KPI economico-fisici

KPI economico-fisico generico	Reference	KPI specifico	Descrizione/Calcolo	Unità di mis.	Livello aggr.	Scale	Obj
Energy cost	L	Energy costs per unit of production	Misura un impatto indiretto nei confronti dell'EE, dal momento che meno energia utilizzata per unità produttiva si traduce in un minor costo per unità produttiva	$\left[ \frac{\text{€}}{\text{unit}} \right]$	Disaggregato	All	min

### 5) Indicatori economici

Indicatori economici (relativi) di tipo generale analizzati:

- Energy dollar:GDP ratio;
- Ratio of energy cost/revenues;
- Impact of energy cost.

Gli indicatori di EE economici misurano le variazioni di EE in termini puramente di prezzi di mercato, ovvero sia l'energia in input che l'erogazione del servizio (output) sono enumerati in termini monetari. Turvey & Norbay (1965) suggeriscono come questo tipo di indicatori [assieme agli indicatori economico-fisici, non ancora sviluppati a quell'epoca] possa risolvere, grazie alla valorizzazione dell'energia, il problema tipico degli indicatori termodinamici di impossibilità di valutazione della qualità dell'energia tra un set di differenti risorse energetiche impiegate nel calcolo.

Uno dei primi indicatori storicamente sviluppati appartenenti a questa categoria è l'indicatore Energy dollar:GDP ratio (Joint Economic Committee of the Congress of the United States, 1981) e definito come:

$$\text{Energy dollar:GDP ratio} = \frac{\text{National energy input (\$)}}{\text{National output (\$)}} \quad [\%] \quad (2.27)$$

Secondo gli autori, questo rapporto riflette in maniera più accurata (rispetto agli indicatori economico termodinamici) la produttività economica della risorsa "energia". Per contro, gli indicatori economici di EE come l'Energy dollar:GDP, rivolti ad applicazioni di livello nazionale o settoriale, si scontrano con il problema di stabilire dei prezzi di energia "ideali" attraverso cui misurare gli input energetici. Questi prezzi ideali, dotati di un sistema di pesi, dovrebbero in teoria "riflettere i tassi marginali di trasformazione in produzione, o i tassi marginali di sostituzione nel consumo dell'energia in forme differenti". Ma dal momento che risulta estremamente difficile tradurre i prezzi ideali attraverso un sistema di calcolo, senza contare le numerose assunzioni che esso richiederebbe, Patterson (1996) conviene con l'idea che gli indicatori economici, non potendo riflettere l'EE fedelmente, non possano essere considerati indicatori di EE veri e propri nella stessa maniera indicatori termodinamici.

Un indicatore economico ma di natura diversa dal precedente, utilizzato a livello corporate (e dunque, secondo l'ISA-95, ad uno scale *Enterprise*) è il Ratio of energy cost/revenues (Prindle, 2010) così definito:

$$\text{Ratio of energy cost:revenues} = \frac{\text{Cost of energy consumption}}{\text{Total revenues}} \quad [\%] \quad (2.28)$$

Esso quantifica dunque la spesa energetica per ogni € di vendite.

Come accennato precedentemente, è comune nel cost accounting considerare l'indicatore di impatto del costo dell'energia sui costi totali.

$$\text{Impact of energy cost} = \frac{\text{Cost of energy consumption}}{\text{Total production cost}} \quad [\%] \quad (2.29)$$

E' chiaro che le vendite totali e i costi di produzione totali sono considerati come output in un indicatore di EE economico, dove l'input è un input di costo del consumo energetico, e l'output valorizzato in termini monetari dipende dall'obiettivo di analisi dell'indicatore.

La Tabella 2.11 riporta i KPI economici revisionati.

Tabella 2.11: KPI economici

KPI economico generico	Reference	KPI specifico	Descrizione/Calcolo	Unità di mis.	Livello aggr.	Scale	Obj
Impact of energy cost	Schieferdecker (2006)	Energy costs based on total costs	$\frac{\text{Cost of energy consumption}}{\text{Total production cost}}$	[%]	Disaggregato	Enterprise Site	min
	L	Energy-related costs as percentage of overall data center expenditures	$\frac{\text{Energy - related cost}}{\text{Overall data center cost}}$	[%]	Disaggregato	Enterprise Site	min
Energy dollar:GDP	Joint Economic Committee of the Congress of the United States (1981)	-	$\frac{\text{National energy input (\$)}}{\text{National output (\$)}}$	[%]	Aggregato	Enterprise	max
Ratio of energy cost:revenues	Prindle, (2010)	-	$\frac{\text{Cost of energy consumption}}{\text{Total revenues}}$	[%]	Aggregato	Enterprise	min

## 6) Indicatori di eco-efficiency

Indicatori di eco-efficiency di tipo generale analizzati:

- Degree of energy from renewable;
- Eco-efficiency;
- GHG Emissions.

Il termine “eco-efficiency” è stato coniato dal World Business Council for Sustainable Development (WBCSD, 1992), e si basa sul concetto che vede la creazione di più prodotti e servizi usando minori risorse, creando minori scarti ed inquinanti. Secondo il WBCSD, aspetti critici dell’eco-efficiency sono: la riduzione dell’intensità di utilizzo di materiale e di energia in prodotti o servizi, la riduzione della dispersione di sostanze tossiche, migliorare la riciclabilità, massimizzare l’uso di fonti rinnovabili, aumentare la durabilità del prodotto. La riduzione dell’impatto ecologico-ambientale si trasferisce in un aumento della produttività della risorsa.

L’indicatore di eco-efficiency (Hendrik & Verfaillie, 2000) è definito come:

$$Eco - efficiency = \frac{Product\ or\ service\ value}{Environmental\ influence} \quad (2.30)$$

L'indicatore di eco-efficiency illustrato in 2.30 è chiaramente un indicatore estremamente generico, visto che esistono numerosi modi di valorizzare il prodotto/servizio e calcolare l'influenza ambientale, che a sua volta richiede spesso l'impiego di altri indicatori. Il calcolo specifico dell'eco-efficiency dipende da quelle che sono le intenzioni di comunicazione e di decision making del caso, nonché dal tipo di industry. Anche in questa situazione, come per altri indicatori revisionati, l'indicatore può riferirsi ad una linea, ad un intero sito produttivo od organizzazioni.

L'indicatore che esprime la percentuale di energia proveniente da fonti rinnovabili (Veleva & Ellenbecker, 2001) è definito come:

$$Degree\ of\ energy\ from\ renewable = \frac{Energy\ from\ renewable\ source\ consumed}{Total\ energy\ consumed} \quad (2.31)$$

di semplice lettura, ha come obiettivo quello di veder massimizzato il contributo di fonti rinnovabili come acqua e vento sul consumo totale di energia.

Infine, probabilmente il più celebre indicatore di eco-efficiency, illustrato in molteplici report ambientali, è l'indicatore GHG (Greenhouse Gas Emissions). Esso quantifica, solitamente attraverso unità di massa, la quantità di gas serra rilasciata in atmosfera. Si tratta di gas che sono trasparenti alla radiazione solare, ma riescono a trattenere, in maniera consistente, la radiazione infrarossa emessa dalla superficie terrestre, dall'atmosfera e dalle nuvole, causando il ben noto effetto serra. Le emissioni GHG possono riferirsi a diossido di carbonio (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), diossido di (N<sub>2</sub>O), idrofluorocarburi (HFC), ecc. Alcuni di essi sono emessi sia a causa di processi naturali che di attività dell'uomo; altri emessi solo a causa delle attività dell'uomo.

La Tabella 2.12 riporta gli indicatori di eco-efficiency revisionati.

Tabella 2.12: KPI eco-efficiency

KPI eco-efficiency	Reference	KPI specifico	Descrizione/Calcolo	Unità di mis.	Livello aggr.	Scale	Obj.
GHG	L	CO <sub>2</sub> emissions in kg per square foot of property space	-	[kg/m <sup>2</sup> ]	Disaggreg.	Site	min
	L	CO <sub>2</sub> emissions	Emissioni di diossido di carbonio da parte dell'azienda	[ton]	Aggregated	Enterprise	min.

Degree of energy from renewable	L	Percentage of volume of water recycled & reused	-	[%]	Disaggreg.	Site	max
	L	Percentage of usage of water from nontraditional sources	Percentuale di acqua proveniente da fonti non tradizionali, ad esempio desalinazione o acqua riciclata	[%]	Disaggreg.	Site	max
Eco-efficiency	L	Water Use/ Net Sales	-	[m <sup>3</sup> /€]	Aggreg.	Enterprise	min
	L	Water used per amount of product manufactured	-	[m <sup>3</sup> /unit]	Aggreg.	Enterprise	min

### 2.3: Monitoraggio, misurazione, analisi e valutazione delle performance di efficienza energetica

La sola classificazione, seppur in maniera strutturata, dello stato dell'arte dei KPI di EE, non trova un suo significato ai fini della realizzazione di una gap analysis orientata al focus di ricerca precedentemente definito se non accompagnata da tutte quelle tematiche relative al ciclo di misura delle performance, quali monitoraggio, misurazione, analisi e valutazione. La sezione corrente esplora questo tipo di tematiche in un'ottica di individuazione delle correnti esigenze del Manufacturing e dei trend futuri sentiti dagli attori di questa industry, al fine di ottenere dei chiari termini di paragone con lo stato attuale della letteratura e delle pratiche aziendali per la stesura della gap analysis. La revisione bibliografica effettuata non è stata tuttavia l'unica fonte di informazione per la comprensione delle esigenze del Manufacturing in questo contesto: l'intervista ad esperti riportata in Allegato C a pag.243 contiene, nella sezione "Contesto aziendale" e soprattutto "Scenario settoriale", domande finalizzate ad ottenere informazioni "esterne", ovvero potenzialmente in grado di arricchire le informazioni deducibili dalla letteratura.

#### 2.3.1: Monitoraggio delle performance di efficienza energetica

Metodi appropriati di misura dell'EE sono essenziali per supportare il decision making nelle aziende manifatturiere per quanto concerne gli aspetti dell'EE. Effettuare un monitoring e un reporting degli indicatori di EE su differenti livelli, come ad esempio il livello macchina, processo, stabilimento, ecc. (analogamente a quanto eseguito nella revisione bibliografica, seppur l'obiettivo è quello di classificazione e non di reporting), è estremamente funzionale all'energy management, in quanto le informazioni energy-related apportate dagli indicatori

abilitano la valutazione del potenziale raggiungibile, delle aree di miglioramento, ecc.

Il monitoraggio dell'EE, i benchmark, e gli audit sono importanti leve di energy management, in quanto consentono ai decision maker di identificare opportunità di miglioramento e tenere traccia degli effetti delle decisioni riguardanti l'utilizzo dell'energia (Kannan & Boie, 2003).

E' proprio il monitoraggio e l'analisi dei consumi energetici delle macchine e dei processi produttivi ad essere il primo passo verso l'aumento di EE: una nuova frontiera è quella del monitoraggio delle macchine utensili, che consente di comprendere in che modo ridurre l'energia utilizzata nei processi produttivi (Herrmann, Bergmann, Thiede, & Zein, 2007), ad esempio identificando le macchine più intensive dal punto di vista energetico. Come già analizzato nel paragrafo 2.1.6: *L'ICT a supporto all'efficienza energetica nelle organizzazioni*, le nuove tecnologie dei sensori e dei device *smart embedded* consentono misurazioni interne ai processi stessi<sup>32</sup>, forniscono ai decision maker dati molto vicini a quello che è il "tempo reale" e forniscono una base sostanziale e significativa per le decisioni di gestione della produzione (Karnouskos, Colombo, Lastra, & Popescu, 2009).

Il monitoraggio, se effettuato ad un livello appropriato è un prerequisito per una buona visualizzazione e rappresentazione dei KPI. Inoltre consente di registrare e valutare gli impatti delle decisioni intraprese per conseguire determinati energy saving (Boie and Kannan, 2003).

I trend in atto riguardanti il monitoraggio energetico prevedono una migliore integrazione dei dati proveniente in tempo reale dei sistemi informativi, processi knowledge-based a livello macchina al fine di aumentare l'EE, sistemi di automazione che includono software in grado di monitorare congiuntamente processi e consumi energetici e tecnologie di sensori per il monitoraggio e la trasmissione delle performance energetiche degli asset di produzione. Sistemi di questo tipo consentiranno di generare un profilo dell'EE completo e olistico dello stabilimento (Bunse, Vodicka, Schönsleben, Brühlhart, & Ernst, 2011).

Ciononostante, il potenziale che il monitoraggio offre si scontra con una barriera tradizionalmente appartenente all'"energy efficiency gap", ovvero la difficoltà di valorizzazione di investimenti relativi ad un sistema di visualizzazione e monitoraggio dei consumi energetici, dal momento che risulta difficoltoso convertire i saving valutati attraverso il sistema installato nel tempo e il costo del sistema, e dell'integrazione tra le diverse piattaforme software del SI.

---

<sup>32</sup> Sia in termini di potenza istantanea (W) , sia potenza utilizzata per un determinato intervallo di tempo (J).



### 2.3.2: Sviluppo di nuovi KPI di efficienza energetica

Il motivo per il quale il titolo della sezione corrente comprende oltre alla misurazione, anche l'analisi e la valutazione delle performance di EE attraverso i KPI, risiede nella considerazione che i soli processi di misurazione e di reporting dei KPI (ad esempio specificazione dei KPI in attributi e dimensioni, sistemi per la visualizzazione dei trend, ecc.) non sono del tutto sufficienti per supportare le aziende nelle pratiche di energy management, né sono del tutto funzionali ad un'integrazione efficace delle performance di EE all'interno del manufacturing.

In passato, già a partire dagli anni '70, e nel corso degli anni, molti attori all'interno del *policy making* hanno prestato parecchia attenzione alla misura dell'EE a livello nazionale o internazionale, orientata a confronti cross-country (Ang, 2006). Sono invece ben pochi gli studi orientati alla singola azienda, al singolo stabilimento o al singolo processo (Bunse, Vodicka, Schönsleben, Brühlhart, & Ernst, 2011), studi che si rendono necessari dal momento che, come visto nel corso del capitolo 2<sup>33</sup>, gli indicatori che utilizzano dati ad alto livello di aggregazione come quelli economici -utilizzati per misure a livello settoriale o nazionale- non si rivelano allo stesso modo adatti per applicazioni orientate all'energy management in un singolo stabilimento.

Ci si aspetta dunque un trend futuro caratterizzato da una maggior attenzione nello sviluppo di indicatori di natura termodinamica o fisico-termodinamica, a seconda dello specifico obiettivo dell'indicatori. Essi infatti sono gli indicatori più appropriati per l'analisi dell'EE nei processi specifici, a differenza di indicatori economici che si rivelano adatti a misure a livello settoriale o nazionale.

E' possibile identificare inoltre delle specifiche direzioni che conducono lo sviluppo di nuovi indicatori di performance di EE a livello di stabilimento/macchina/processo. Tali direzioni sono conseguenze di un'attenzione sempre maggiore delle organizzazioni nei confronti dell'energy management e dell'integrazione delle performance di EE nel manufacturing, come riportato nel capitolo introduttivo.

Prima tra tutte è la direzione che riguarda l'implementazione degli standard relativi all'energy management (ISO50001, EN16001) all'interno delle organizzazioni. Come evidenziato nel paragrafo 2.1.5: *Energy management* a pag. 42, sebbene gli standard forniscano una serie di guideline per mettere in atto il meccanismo di misurazione, controllo e miglioramento continuo, esse non supportano in maniera completa le organizzazioni in meccanismi più specifici come il setting dei target energetici, e- in relazione al focus di ricerca della

---

<sup>33</sup> Sia nel background teorico –paragrafo

2.1.3: Efficienza **energetica**, in relazione all'Energy Intensity) – sia nello ambito delle dimensioni di classificazione dei KPI di EE, (dimensione del livello di aggregazione dei dati dei KPI di EE, paragrafo 2.2.1).

trattazione- l'implementazione di decision support tool o la definizione di KPI di EE, per i quali le aziende sono chiamate a sviluppare delle risposte basate sullo specifico caso.

Altri esempi di direzioni possibili dei trend futuri, relativamente al focus della ricerca e in particolare ai KPI di EE, sono stati raccolti da Bunse et.al (2011) tramite interviste ad esperti nell'industry del Manufacturing, e sono:

- Misure di EEM per identificare inefficienze nell'ambito dell'utilizzo di energia in uno stabilimento;
- Misure standard di EE ed emissioni di carbonio;
- Standardizzazione delle misure delle performance ambientali, inclusi i KPI di EE;
- KPI progettate per abilitare la rilevazione dei cambiamenti e dei miglioramenti nell'EE; ecc.

La letteratura che ha analizzato alcune delle esigenze delle industry del Manufacturing in questo contesto (Bunse, Vodicka, Schönsleben, Brühlhart, & Ernst, 2011), (Braglia, Zanoni, & Zavanella, 2003), ecc. rivolge un'attenzione particolare alle possibilità, e alle difficoltà annesse, di applicazione dei KPI di EE nell'ambito del benchmarking, in particolare per quanto concerne il consumo energetico. Anche in questo caso i decision maker del settore richiamano lo sviluppo di metodi e criteri che abilitino il benchmarking, e conseguentemente l'adozione di determinate best practice, delle performance di EE tra processi, impianti e stabilimenti simili (Frauenhofer-Gesellschaft, 2008).

Anche in questa situazione i *policy maker* si sono occupati di benchmarking a livello nazionale al fine di assegnare le giuste priorità alle differenti policy applicabili, mentre sono pochi gli studi in letteratura riguardanti il benchmarking al livello di singolo stabilimento<sup>34</sup>, resi difficoltosi dai criteri di performance in conflitto tra di loro, dalla non comparabilità di alcune attività e dall'ampio spettro di criteri di valutazione disponibili (Braglia, Zanoni, & Zavanella, 2003).

### **2.3.3: PMS e Framework di indicatori di efficienza energetica**

Nella sezione precedente è stato visto in quale modo le performance di EE sono misurate attualmente da parte delle organizzazioni attraverso determinati KPI di EE di diversa natura, costituiti da dati di diverso livello di aggregazione, applicati a scale differenti, con applicazioni eterogenee tra loro, ecc. L'insieme dei KPI di EE attualmente esistente è stato suddiviso sulla base della natura degli indicatori, e classificato attraverso delle dimensioni appropriate.

---

<sup>34</sup> Tra questi, lo sviluppo dell'Energy Performance Indicator nell'ambito del progetto Energy Star (Boyd, Dutrow, & Tunnessen, 2008), inserito all'interno dello stato dell'arte dei KPI di EE in questa trattazione.

Come sottolineano però Bunse et. al,(2011), non è auspicata una “proliferazione” così eterogenea di misure delle performance di EE; al contrario, come visto nel paragrafo precedente, si risente di una mancanza di KPI standardizzati. La ricerca si sta conseguentemente orientando verso questa direzione, concentrando i suoi sforzi verso la definizione di un set comune e accettato a livello globale, di indicatori di sviluppo sostenibile<sup>35</sup>, all’interno del quale sono compresi gli indicatori di EE. Esempi di ricerca in questo senso sono Vera & Langlois, 2007, Feng & Joung, 2009 -che forniscono metodi di misura e linee guida per questo tipo di indicatori- e Veleva & Ellenbecker (2001) che basandosi sul Lowell Center Indicator Framework, propongono una nuova metodologia di indicatori *core* e supplementari di sustainable production. L’analisi della letteratura effettuata da questi ultimi autori era conseguentemente incentrata sui framework di indicatori e sull’evidenziazione delle loro debolezze: sono stati analizzati framework come il Global Reporting Initiative (GRI), World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), e l’International Organization for Standardization ISO 14031.

Ecco ciò che emerso in termini di punti di debolezza riguardanti tematiche connesse in maniera più evidente all’EE o ad ogni modo connesse allo sviluppo di un buon framework di indicatori:

- Molti framework di indicatori sono sviluppati in virtù di un’intenzione interna da parte del management. Essi dunque non riflettono un’esigenza di trasparenza e coinvolgimento degli stakeholder nel processo di formulazione e valutazione degli indicatori. Il GRI fa eccezione, dal momento che esso è sviluppato in primis per il reporting esterno;
- Nella maggior parte dei framework sono ampiamente coperti aspetti come l’utilizzo del materiale e la protezione dell’ambiente, altri aspetti inerenti lo sviluppo sostenibile sono invece trascurati (ad esempio l’EE);
- Nel tentativo di rappresentare performance di tipo economico, molti framework utilizzano i tradizionali indicatori economici (quota di mercato, vendite, profittabilità) senza che siano in alcun modo collegati ad aspetti riguardanti la sostenibilità;
- Mentre l’ ISO 14031 e il GRI includono circa cento indicatori, si auspica il contenimento del numero di indicatori da gestire, in un intervallo che va dai dieci ai venti indicatori;

---

<sup>35</sup> Sono considerati in questa sezione i framework di indicatori di sviluppo sostenibile dal momento che non sono stati rilevati in letteratura framework strutturati delle performance di EE.

- E' comune nei framework la mancanza di una guida chiara e dettagliata di come implementare nella pratica il sistema di indicatori. Anche il GRI, normalmente framework di sostenibilità più "acclamato" non fa eccezione: esso infatti non fornisce nessuna linea guida su come selezionare e implementare gli indicatori.

#### **2.3.4: Analisi, valutazione e controllo delle performance energetiche**

Prendere corrette decisioni e valutare i miglioramenti potenziali nell'EE dipende strettamente da come i KPI e i sistemi di misura delle performance all'interno dei quali sono organizzati vengono definiti e sviluppati.

Attualmente, i sistemi di indicatori delle performance di efficienza più strutturati e orientati alla valutazione diretta delle performance stesse sono quelli sviluppati in riferimento alle performance time-based. Esempi possono essere gli indicatori di produttività, resa, utilizzo, rendimento, ecc., oppure indicatori come l'Overall Equipment Effectiveness, (indicatore sviluppato negli anni '60 dal "padre" riconosciuto del Total Productive Maintenance, Seiichi Nakajima). Questi indicatori, usati correntemente nel mondo industriale, misurano l'efficienza di macchine e impianti da un punto di vista time-based, e costituiscono un forte strumento a supporto del decision making grazie alle informazioni che essi sono in grado di apportare al management. Un approccio di questo tipo, applicato agli indicatori di performance energy-related, potrebbe potenzialmente aumentarne la capacità di supportare le decisioni ad esse relative.

Rahimifard, Seow, & Childs (2010) affermano che gli strumenti commerciali di energy management attualmente presenti forniscono attualmente un alto livello di overview dei consumi energetici all'interno del sistema produttivo, e conseguentemente non sono in grado di modellare l'analisi dettagliata dei flussi di energia tra i vari processi, stazioni di lavoro e aree produttive. In riferimento all'esigenza di andare oltre la pura misurazione e reporting dei KPI, è importante comprendere soprattutto quali siano le cause che comportano una variazione dei valori assunti dai KPI nel tempo, o tra aziende diverse. La comprensione di queste cause è fondamentale per la corretta interpretazione delle leve da utilizzare per poter rendere più efficace il miglioramento continuo delle performance di efficienza energetica.

Uno dei punti deboli di un tool come quello dei KPI per lo studio e l'analisi delle performance di efficienza energetica è che essi non sembrano, allo stato attuale, essere indirizzati a facilitare la conoscenza di *come* l'energia viene utilizzata, e sprecata, nei processi produttivi, dal momento che gli indicatori forniscono misure di consumo energetico aggregate (kWh per parte prodotta, per euro di vendite o di GDP, ecc). Esistono tuttavia delle eccezioni: dallo stato dell'arte dei KPI termodinamici, gli indicatori di Energy Efficiency of Management (Cannata, 2011) riflettono l'utilizzo dell'energia in stati a valore aggiunto e non a valore aggiunto.

Questo approccio è sicuramente uno degli approcci meglio adatti allo sviluppo di indicatori a supporto dell'energy management.

Uno dei motivi per i quali si considerano misure di dati di consumo energetico aggregate non risiede soltanto nella "struttura" dell'indicatore, ma anche il monitoraggio e il record dei dati relativi al consumo energetico da parte del sistema informativo a livello shop floor, che conduce a misurazioni poco collegate tra di loro. In questo contesto, una serie di studi hanno evidenziato gli importanti saving raggiungibili grazie ai sistemi ICT e tecniche appropriate.

Dal momento che si auspica un'integrazione dell'EEM all'interno delle "five golden metric" del Manufacturing (come illustrato dalla Figura 1.7), un'efficace comprensione delle relazioni che sussistono tra la gestione della produzione -e in generale- le performance *manufacturing-based* ed efficienza energetica gioca un ruolo chiave per il successo di tale integrazione.

La comprensione delle relazioni di causa-effetto tra sistema manifatturiero e performance energetiche è dunque estremamente vantaggiosa nei confronti di un buon energy management: le cause individuate possono essere studiate dal management per poter prevedere ad esempio i trend dei valori assunti dagli indicatori, ricavare le relazioni sussistenti tra i KPI, individuare le leve a minor costo attraverso cui agire per abilitare il miglioramento delle performance di efficienza energetica e ottenere energy-saving.

Sono sotto riassunti i punti principali della sezione 2.3 trattata. Gli argomenti sono visualizzati secondo una matrice le cui righe rappresentano gli "oggetti" principali della sezione (*what*, ovvero KPI<sup>36</sup> di EE, e PMS e Framework di KPI di EE), mentre le colonne sono rappresentate dal modo in cui (how) questi oggetti possono essere studiati all'interno del mondo accademico e utilizzati all'interno delle aziende (ovvero misura, analisi, valutazione e miglioramento).

---

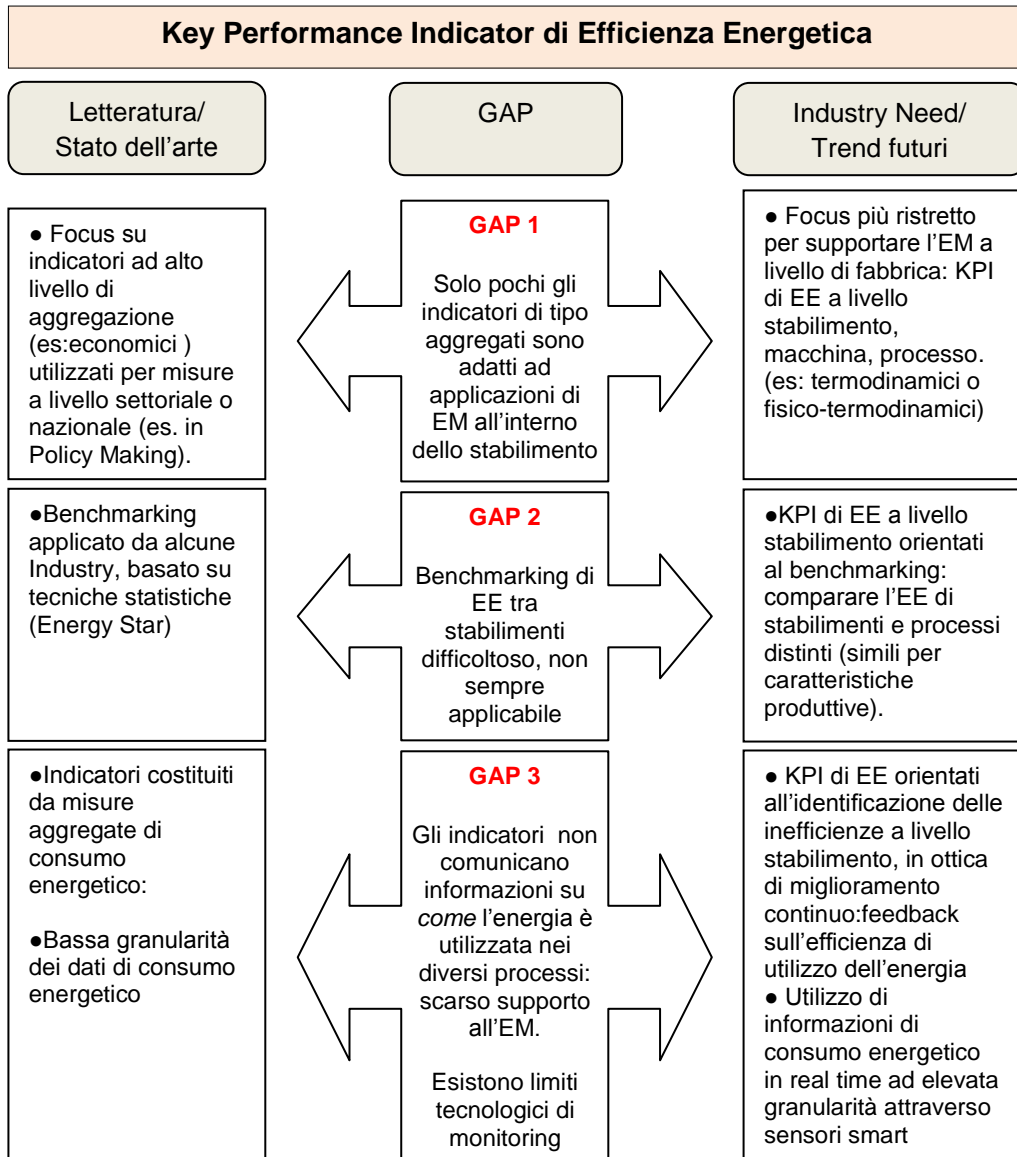
<sup>36</sup> La differenza tra KPI di EE e Framework & PMS di EE risiede nel fatto che il primo topic riguarda aspetti inerenti i singoli KPI, mentre il secondo riguarda aspetti che coinvolgono set, framework e PMS di KPI nel complesso.

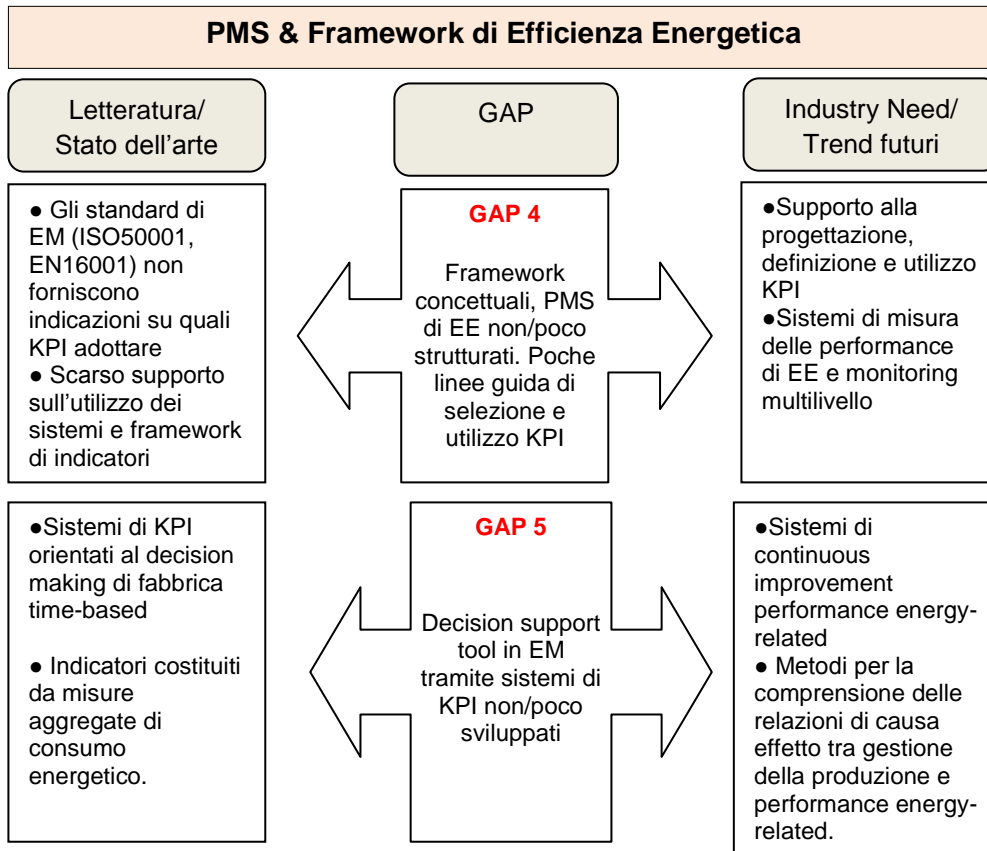
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <span>what</span> <span>how</span> </div>	Misura	Analisi	Valutazione e Miglioramento
KPI di EE	KPI di EE a livello stabilimento, macchina, processo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• KPI di EE standardizzabili e orientati al benchmarking.</li> <li>• Focus sul consumo energetico</li> </ul>	KPI per identificare le inefficienze a livello stabilimento, e abilitare la rilevazione dei miglioramenti dell'EE
FRMAEWORK & PMS di EE	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Misurazione delle performance e monitoring multilivello.</li> <li>• Utilizzo di informazioni di consumo energetico ad elevata granularità, in real time, attraverso sensori smart</li> </ul>	<p>Implementazione di <i>decision support tool</i> e definizione di KPI specifici a supporto all'implementazione degli standard di Energy Management (ISO50001, FN16001)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Metodi di sviluppo dei KPI decision making-oriented.</li> <li>• Metodi per la comprensione delle relazioni di causa effetto tra gestione della produzione e performance energy-related.</li> <li>• Guideline per interpretare e utilizzare i KPI in ottica continuous improvement</li> <li>• Comprensione relazioni tra KPI energy-related</li> <li>• Framework e Framework Concettuali di EE</li> </ul>	<p>Sistemi di misura delle performance e monitoring multilivello per abilitare valutazione e miglioramento</p>

## 2.4: Gap Analysis

La revisione bibliografica si conclude con la gap analysis, che si propone di cogliere i punti più importanti di quanto analizzato all'interno della revisione bibliografica, mettendo a confronto lo stato attuale delle pratiche aziendali e degli approcci adottati in letteratura con le esigenze emergenti e i trend futuri precedentemente illustrati. La presenza di gap ben definiti e circoscritti costituisce una potente linea guida per la definizione delle RQ e RO, che verranno formulate nel capitolo successivo.

Ciascun gap viene definito sia per quanto riguarda i singoli KPI (*KPI di EE*), sia per quanto riguarda i sistemi strutturati di KPI di EE (*PMS/Framework di KPI di EE*).







## Capitolo 3 : RESEARCH FRAMEWORK & RESEARCH METHODOLOGY

Il seguente capitolo si articola in due sezioni: 3.1: *Research framework* e 3.2: *Research Methodology*. Esso ha la funzione di raccordare la revisione bibliografica con i capitoli *core* della trattazione secondo un'ottica rispettivamente di framework generale della trattazione (sezione 3.1) e metodologia condotta per il raggiungimento dei risultati (sezione 3.2).

### 3.1: Research framework

Questa sezione illustra nel paragrafo 3.1.1 le Research Question (RQ) e Research Objective (RO) della trattazione formulate sulla base della gap analysis precedente, mentre nel paragrafo 3.1.2 il Research Framework mostra olisticamente i legami funzionali tra le RO all'interno dello scope di ricerca, gli strumenti utilizzati, l'approccio condotto e gli impatti della metodologia "declinata" nelle sue RO in un contesto di sustainable manufacturing.

#### 3.1.1: Research Question & Research Objective

In relazione a quanto emerso nella gap analysis, viene formulata la seguente RQ:

*Come migliorare l'efficienza energetica nel Manufacturing comprendendo le implicazioni delle performance time-based manifatturiere all'interno delle performance energy-related?*

Questa RQ, generica e ad ampio spettro, è scomposta in due differenti "sub-Research Question", che verranno chiamate RQ1 e RQ2, sotto descritte.

RQ1: "Attraverso quale approccio le performance di efficienza energetica possono essere efficacemente selezionate, comprese, misurate e ulteriormente sviluppate dalle aziende manifatturiere?"

RQ2: "In che modo supportare il decision making nell'Energy Management delle aziende manifatturiere attraverso misure di performance di consumo energetico orientate al continuous improvement?"

Per ognuna di queste RQ sono stati associati i relativi Research Objective (RO), ovvero gli obiettivi che la trattazione si propone di raggiungere per poter rispondere alle RQ formulate.

E' molto importante sottolineare il fatto che lo sviluppo della RO2 non è effettuata in "parallelo" a quello della RO1, bensì discende direttamente dalla RQ1 e dal modo in cui le relative RO sono sviluppate all'interno della trattazione.

In particolare, le RO riferite alla RQ1 sono le RO1 e RO2, sotto descritte.

RO1: Proporre un framework multidimensionale e scalabile di Performance Measurement System (PMS) di efficienza energetica, progettato per essere standardizzabile e flessibile in termini di applicabilità all'interno dell'industry del discrete Manufacturing.

RO2: Utilizzare il framework proposto per circoscrivere al suo interno l'area maggiormente critica in termini di esigenza di un *tool* a supporto del decision making nell'Energy Management, a cui la RQ2 verrà riferita.

Le RO3, RO4, RO5 sono le RO relative alla RQ2, sotto descritte. In particolare, la RO3 è l'obiettivo principale "in risposta" alla RQ2, a sua volta suddiviso nei sotto-obiettivi RO4, RO5.

RO3: Sviluppare una nuova metodologia che abiliti l'analisi e miglioramento delle performance di consumo energetico in qualità *decision support tool* per gli energy manager basata sulla progettazione e l'utilizzo di appropriati Key Performance Indicator.

RO4: Progettare -attraverso un approccio omnicomprensivo che integri visione energetica e visione manifatturiera dello stabilimento- Energy KPI<sup>37</sup> che evidenzino in maniera puntuale l'efficienza delle operations e del management dello stabilimento nei confronti del consumo energetico della risorsa in esame;

RO5: Introdurre delle guideline per un utilizzo efficace degli Energy KPI in azienda, con l'obiettivo di consentirne una gestione appropriata da parte del management e abilitare il miglioramento delle performance energy-related tramite le informazioni da essi apportate.

### 3.1.2: Research Framework

La figura 3.1 illustra il *research framework*, che rappresenta in maniera strutturata la *summa* della struttura metodologica adottata nella conduzione delle RO al fine di rispondere efficacemente alle RQ formulate.

---

<sup>37</sup> La definizione di Energy KPI è fornita nel paragrafo di *Research Framework* successivo

In alto è stato rappresentato qualitativamente il significato della RQ generica formulata nella trattazione. Ciascuna RO è riportata in figura nella maniera in cui essa si colloca all'interno del framework.

Il paragrafo procede chiarendo il significato dei concetti sviluppati nella metodologia, espressi attraverso determinati termini in figura 3.1, chiarendone gli *scope*. Sono inoltre illustrati i tool modellistici utilizzati a supporto della realizzazione della metodologia.

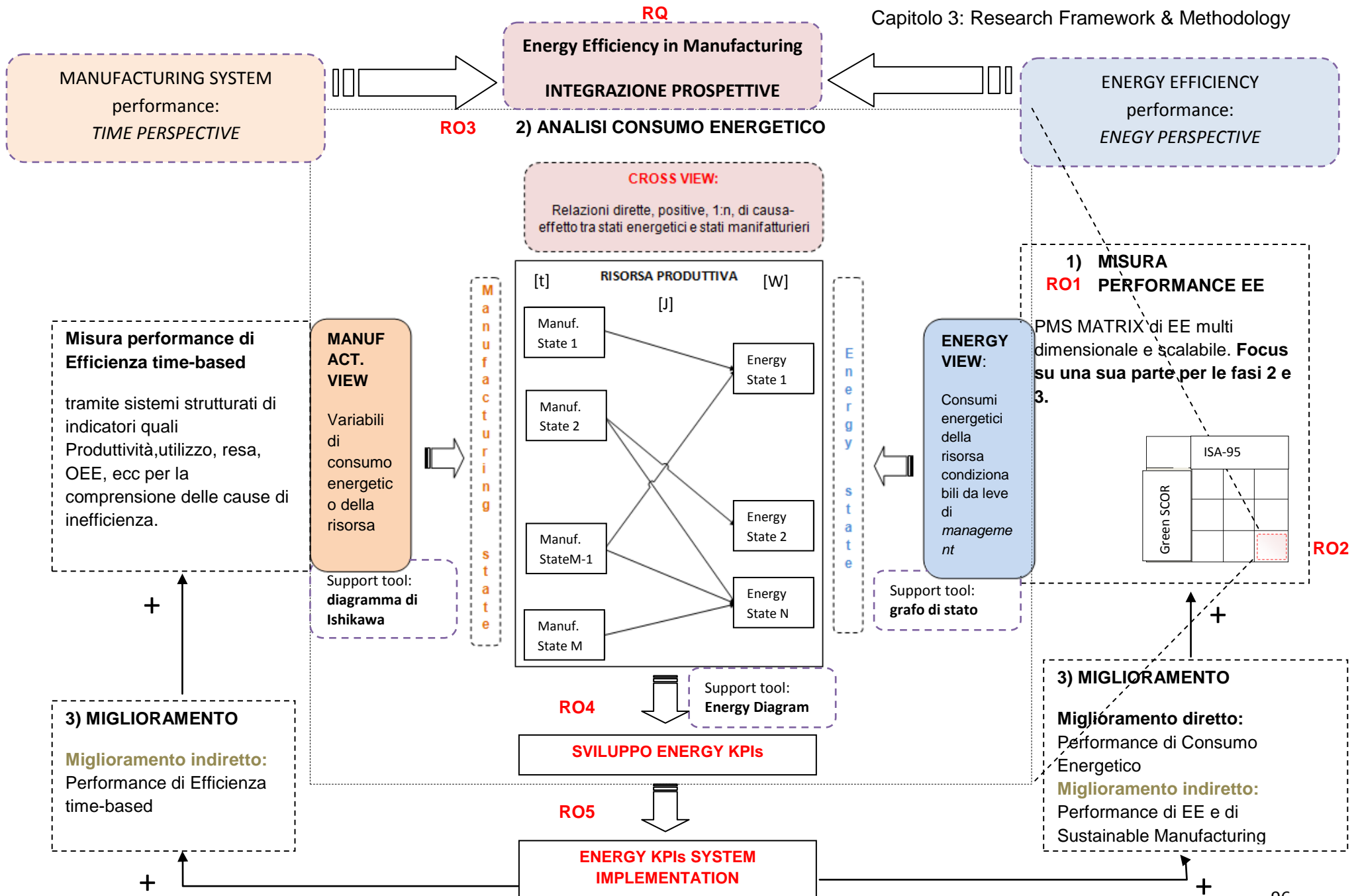


Figura 3.1: Research Framework

A lato sinistro in alto è idealmente rappresentato il sistema produttivo, indicato con “Manufacturing System”. La prospettiva con il quale il sistema produttivo è valutato comprende una misura e un’analisi di performance quali il tempo, il costo, la qualità e la flessibilità. In particolare, quando si parla di efficienza, il tempo assume un ruolo di primaria importanza dato che gran parte degli indicatori impiegati per descrivere le performance di efficienza nei sistemi produttivi (es: gli indicatori di saturazione, di utilizzo, di produttività, ecc.) si basano sulla considerazione di determinati intervalli temporali (in alcuni casi anche di quantità di produzione) sul tempo solare considerato, o su altri intervalli presi come riferimento, in funzione dell’obiettivo di analisi dell’indicatore. Questo è il motivo per il quale il *Manufacturing View* può essere inteso come sinonimo di *Time View* in questa trattazione.

Al lato destro l’energia, e la prospettiva energetica sotto la quale le performance di EE sono tradizionalmente misurate tramite indicatori. I KPI di EE sono stati esaustivamente revisionati e analizzati nel capitolo 2 precedente.

Un’efficace integrazione delle due prospettive attraverso un approccio omnicomprensivo che integri visione energetica e visione manifatturiera del sistema produttivo consente di migliorare l’EEM, ovvero migliorare congiuntamente sia le performance energy-related che le performance time-based del sistema manifatturiero. Questa affermazione è visibile nel Research Framework in figura: gli “elementi” del miglioramento continuo sono stati numerati: “1” per la misura, “2” per l’analisi e “3” per il miglioramento. In particolare si vede come l’adozione della metodologia proposta abbia un impatto in termini di miglioramento diretto sia sul consumo energetico, e di miglioramento indiretto sul sistema performance.

L’integrazione tra le due prospettive è realizzata attraverso la *cross view*, ovvero l’individuazione delle relazioni di causa effetto tra gli elementi delle due “view” di *Manufacturing/Time View* e *Energy View* dello stesso sistema produttivo. La *cross view* abilita il processo di generazione degli indicatori, e gli indicatori - progettati per supportare il decision making- abilitano a loro volta il miglioramento delle performance attraverso l’adozione di piani d’azione, le cui direttive discendono dalle informazioni apportate dai KPI sviluppati.

Si analizzano brevemente le tre parti principali della trattazione rispondenti al punto 1, 2 e 3 in figura 3.1:

#### 1. Misura delle performance di EE

Il sistema produttivo spiegato sopra è volutamente non circoscritto in termini di scope: conseguentemente non sono circoscritti lo scope KPI di EE riferiti al sistema produttivo.

Esistono notevoli possibilità di casi d'uso all'interno delle quali la RQ formulata può essere applicata. Per comprendere in maniera esaustiva la casistica possibile e supportare il processo di individuazione del focus all'interno del quale la metodologia di formulazione degli Energy KPI avrà luogo è stato formulato un framework concettuale di PMS di EE (RO1, sviluppato nel capitolo 4).

Il framework, come si nota in figura, è multidimensionale; la sua è una struttura matriciale. L'individuazione delle dimensioni di progettazione è stata effettuata secondo un criterio di standardizzazione e flessibilità dell'utilizzo del framework da parte delle aziende manifatturiere.

Previa illustrazione teorica del processo di selezione dei KPI di EE da parte dell'aziende, sono stati selezionati dei KPI di EE tra quelli revisionati nel capitolo 2 e usati come "tester" all'interno del framework, al fine di facilitarne la comprensione nell'utilizzo: i KPI di EE sono dunque collocati nelle celle appropriate del framework.

A questo punto entra in gioco l'individuazione di uno *scope* di applicazione della metodologia all'interno del quale la RQ2 viene sviluppata. Le informazioni apportate dalla gap analysis si inseriscono in questo contesto, motivando la scelta di sviluppo di nuovi KPI nello *scope* costituito dalla "cella" *Make-Work Unit*. A riprova valore di supporto fornito dal framework, vengono indicati esempi di possibili sviluppi del RQ formulato per altre celle del framework.

## 2. Analisi del consumo energetico

A questo punto si entra nel dettaglio della metodologia. Una funzione "supplementare" del paragrafo di Research Framework è di illustrare lo *scope* all'interno del quale la metodologia si muove. Verrà dunque illustrato lo *scope* delle due view, e conseguentemente definizione e *scope* degli Energy KPI.

### 2.1 Manufacturing view e suo *scope*:

Nel tentativo di analizzare quali siano le relazioni di causa effetto tra sistema manifatturiero e performance di EE e di "visualizzare" l'effetto di tali cause attraverso appropriati Energy KPI si va incontro ad un ampissimo panorama di driver possibili.

Morvay & Gvozdenac in "Applied industrial energy and environmental management" (2008) mostrano come esistano sia fattori esterni che fattori interni che influenzano le operations industriali generali. La Figura 3.2 illustra esempi di questi fattori, declinati successivamente in una prospettiva di energy & environmental performance

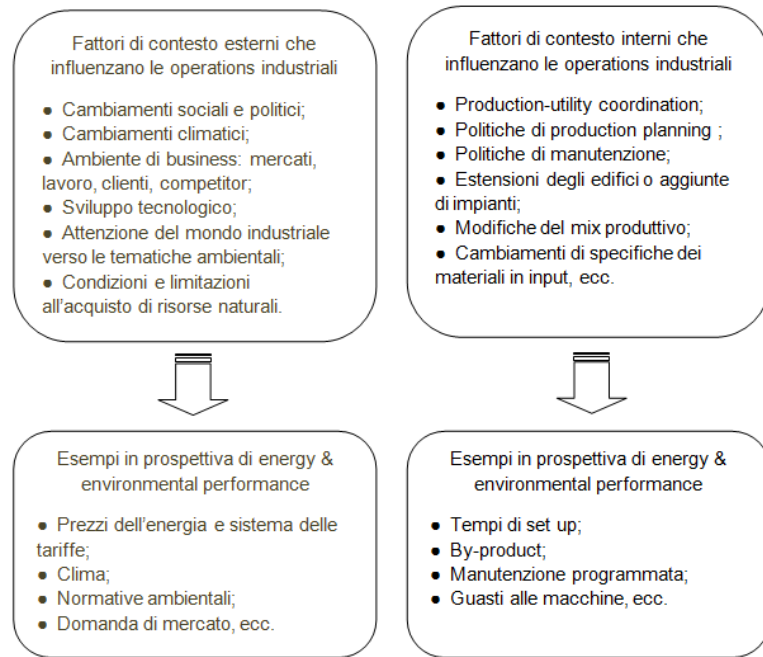


Figura 3.2: Fattori di contesto esterni ed interni che influenzano le operations industriali.

Qualsiasi comprensione delle variazioni dei valori di indicatori di performance energy-related o environmental-related deve necessariamente essere contestualizzata attraverso questi fattori.

Come si evince dalla Figura 3.2, in questa trattazione i fattori esterni sono considerati *out of scope* (i fattori di contesto esterni sono riportati in grigio): per la definizione delle *variabili di consumo energetico*<sup>38</sup> si sceglie di considerare esclusivamente fattori endogeni. In particolare, i fattori interni che si sceglie di analizzare e di inserire all'interno della metodologia per la costruzione degli Energy KPI sono intesi come *condizioni di inefficienza*.

Si riportano le definizioni più importanti inserite nella figura 3.1 del research framework relative al manufacturing view, necessarie ad un'efficace comprensione del reserach framework e della metodologia proposta.

Il *time/manufacturing view* della risorsa comporta la determinazione di tutti gli stati temporali/manifatturieri in cui essa può trovarsi durante il suo funzionamento, normale o degradato. Gli stati manifatturieri definiscono in maniera univoca una condizione di inefficienza (intesa come perdita, o spreco) che impatta sui diversi consumi energetici della risorsa stessa. Per questo motivo gli stati manifatturieri sono definiti, per questa trattazione, *variabili di consumo energetico*. L'univocità della definizione della condizione di inefficienza consente di raggruppare le variabili in *cluster di responsabilità aziendale*, tali che ogni stato appartenga ad uno ed un solo cluster;

<sup>38</sup> La definizione di variabile di consumo energetico è fornita alla pagina successiva.

- Le *variabili di consumo energetico* sono particolari stati del sistema esprimibili come intervalli di tempo, misurati in [t]. Nella trattazione esse sono sinonimi di stati energetici.
- Le *variabili di II livello* (non rappresentate nel framework in figura) possono essere viste come “cause delle cause” (ovvero causa di ciascuno stato energetico). Sono di fatto “manopole” sulle quali si può agire attraverso un appropriato *management* del sistema produttivo per poter ridurre l'intervallo temporale dello stato manifatturiero associato, e quindi il relativo consumo energetico, dal momento che tali intervalli saranno associati a determinati power requirement [W] attraverso la cross view. Le variabili di II livello possono essere sia qualitative e quantitative
- I *cluster di responsabilità aziendale* sono creati nella metodologia con l'obiettivo di indirizzare in maniera univoca i consumi energetici rilevati ad un set ben definito di attori all'interno dell'organizzazione, che saranno conseguentemente coinvolti nei piani di azione per il miglioramento delle performance energy-related. Questo approccio risulta dunque estremamente funzionale in termini di supporto all'EM che la metodologia si propone di garantire.

## 2.2: Energy view e il suo scope:

Essendo un approccio fondato sull'EM, l'*energy view* della risorsa è ottenuta domandandosi quali siano i suoi power requirement elettrici [W] la cui *durata* (e quindi il consumo energetico ad essi associato) possa essere potenzialmente influenzata da decisioni prese a livello di management della risorsa o del sistema produttivo nel complesso. Questi power requirement rappresentano nella metodologia gli *energy state*: stati energetici.

Il miglioramento delle performance di EE della risorsa attraverso il monitoraggio e l'analisi del suo consumo energetico viene abilitato in questa trattazione da leve esclusivamente di tipo gestionale. Questa assunzione condiziona il livello di dettaglio delle potenze da considerare.

Ad esempio, inserire tra gli stati energetici la potenza richiesta da singoli componenti ausiliari di un centro di lavoro è *out of scope*, in quanto si tratta di potenze, e quindi di consumi energetico ad essi associato, pressoché costanti e non condizionabili gestionalmente (Gutowski, Dahmus, & Thiriez, 2006). Mentre è *in scope* la potenza assorbita dalla macchina -nel suo complesso- in stato di idle, quando essa è ferma, ma con tutti i componenti attivi (e quindi che assorbono energia) pronti per lavorare: l'idle della macchina è uno stato



energetico, oltre che manifatturiero, fortemente condizionabile da leve di management, ad esempio da un miglior scheduling di produzione.

### 2.3: Cross View

E' importante precisare che il termine Cross View del quale la metodologia prende il nome (essendone la fase *core*) non proviene da alcun riferimento bibliografico, bensì è un termine scelto per rendere intuitivamente chiaro l'importanza del collegamento tra la visione temporale e la visione energetica della risorsa per la costruzione di Energy KPI che mettano in luce l'impatto delle relazioni di causa (stati manifatturieri) ed effetto (consumo energetico).

### 2.4: Energy KPI: definizione e *scope*

Lo *scope* formulato per le condizioni di inefficienza da considerare nella metodologia (punto 2.1 precedente) determina conseguentemente la natura degli Energy KPI:

Per Energy KPI si intende un indicatore costituito da dati di consumo energetico e dati di produzione raccolti dallo shop floor in continuo o in tempo discreto finalizzato a mettere in luce il grado di efficienza delle differenti operations e della gestione della produzione del sistema manifatturiero nei confronti del consumo di energia di una risorsa produttiva.

Sebbene nelle applicazioni industriali l'energia possa essere impiegata in forme diverse quali elettricità, acqua, aria compressa, gli Energy KPI sono riferiti a consumi di energia elettrica. Tale focus è motivato in primis dal fatto che normalmente analisi approfondite energy-related si focalizzano su una singola risorsa energetica (solitamente elettricità e acqua), e che l'elettricità è una forma di energia finale utilizzata necessariamente da parte di tutti gli stabilimenti produttivi.

Gli Energy KPI si propongono di rappresentare quanto consumo di energia elettrica in input alla risorsa produttiva selezionata è "energia a valore aggiunto", ovvero utilizzata per la produzione di output vendibile, e quanto è invece sprecato da parte di operations, procedure, e management inefficienti con il quale il sistema produttivo viene gestito.

In questo modo gli Energy KPI mostrano in maniera chiara quali siano i maggiori "responsabili" dei consumi energetici più elevati, consentendo di riconoscere con trasparenza aree di miglioramento in cui poter ottenere futuri saving energetici.

Coerentemente con uno scope di considerazione dei fattori interni, gli Energy KPI sono sviluppati attraverso misure relative, in modo da restituire valori non inficiati dalle variazioni della domanda di mercato, mentre l'effetto delle variazioni di

prezzo non ha alcun impatto su questo tipo di indicatori, essendo KPI di consumo energetico, per il quale si considerano misure in Joule. Anche i cambiamenti climatici o connessi ad esempio alla stagionalità sono trascurabili, dal momento che il focus della trattazione è nel suo complesso sul manufacturing system (si veda 1.2.1: *Confini del lavoro* a pag. 13), e la metodologia cross view viene riferita in questa applicazione alla macchina utensile, per cui eventuali picchi di consumo di energia elettrica causati da un maggior condizionamento della fabbrica non è certamente preso in considerazione.

Vengono ora illustrati gli strumenti utilizzati nella metodologia a supporto della fase 2 di analisi del consumo energetico, sia nella time view che nell'energy view.

### 2.5: Support tool impiegato nella time view: diagramma di Ishikawa

Dal momento che le variabili di consumo energetico in questa trattazione sono *cause* dell'*effetto* di consumo energetico, un tool appropriato che guidi il processo di individuazione delle variabili di consumo energetico e/o un chiaro processo di rappresentazione delle cause può essere riconosciuto nei diagrammi di Ishikawa. Sviluppato in Giappone da Kauru Ishikawa nel 1943, e nati storicamente con un *purpose* di supportare la soluzione dei problemi di qualità, essi possono essere intesi sia come mezzo per la rappresentazione sintetica delle cause di un problema, sia come strumento per l'individuazione delle cause stesse e quindi delle soluzioni del problema. In questo secondo caso, si ricorre spesso alla tecnica del brainstorming e alla selezione delle cause rilevanti attraverso ad esempio diagrammi di Pareto. La Figura 3.3Figura 3.4 illustra il diagramma di Ishikawa di alto livello, con le sette tradizionali cause primarie individuate da Ishikawa.

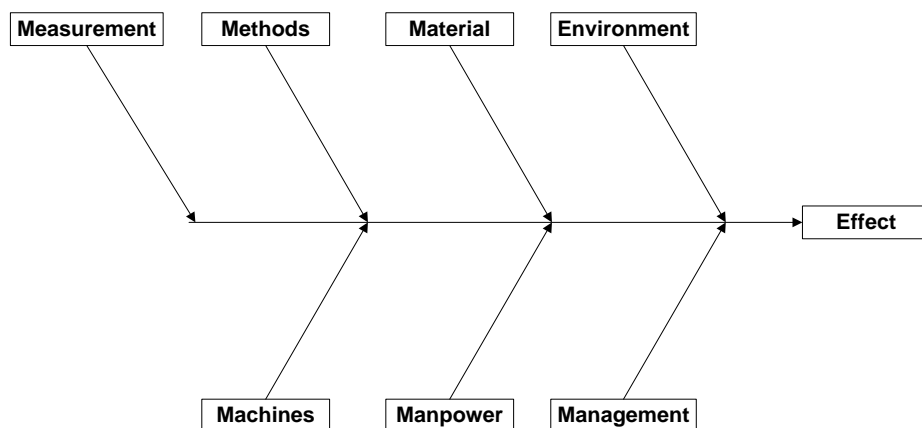


Figura 3.3: Diagramma Ishikawa standard: cause primarie ed effetto.

Essendo un tool estremamente funzionale nel suo obiettivo, esso viene impiegato in settori diversi e per problematiche eterogenee, anche molto differenti dunque dal controllo qualità. Il processo di identificazione delle cause può procedere in maniera incrementale, per livelli di dettaglio sempre più piccoli

“domandandosi” a cascata quale siano le cause delle cause primarie (cause secondarie), le cause delle cause secondarie, ecc.

E' molto importante stabilire che le “cause” di Ishikawa rappresentavano *problemi* da risolvere, e non confondere con le condizioni, i vincoli imposti dal contesto, che delimitano l'ambito di movimento della ricerca della soluzione.

Per questo motivo si ritiene appropriato l'inserimento delle variabili di consumo energetico in qualità di *cause* del diagramma “a lisca di pesce”, dal momento che esse sono variabili che, in misura più o meno facile, più o meno economica, sulle quali si può intervenire per migliorare le performance energy-related di consumo energetico “pilotando le variabili di II livello”, che rappresentano invece le cause secondarie all'interno del diagramma. I cluster di responsabilità aziendale sono invece equivalenti a categorie di cause del diagramma di Ishikawa.

L'applicazione del tool di diagramma d Ishikawa all'interno della metodologia cross view è esplicitato qualitativamente in Figura 3.4.

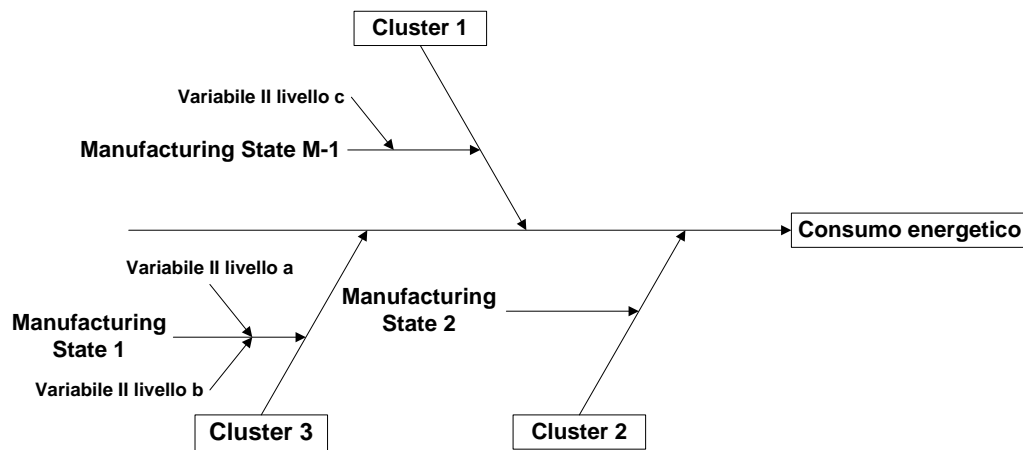


Figura 3.4: Struttura generale del diagramma di Ishikawa applicato all'interno della metodologia cross view.

### 2.5: Support tool impiegato nella energy view: diagramma a stati

Il diagramma a stati è uno dei modelli più appropriati per lo studio della dinamica dei sistemi ad eventi discreti: questo tipo di modellizzazione del comportamento energetico di un sistema è stata effettuata in trattazioni precedenti con l'obiettivo di ottimizzare il consumo e le performance energetiche della risorsa attraverso la simulazione (Prabhu & Taisch), (Calvanese, 2012), dal momento che è possibile considerare come “stato” del sistema la potenza istantanea, il consumo energetico come funzione della durata della potenza, e il passaggio tra una potenza e l'altra come dipendente da eventi che possono accadere sia a livello della risorsa in esame che a livello di sistema produttivo (che ovviamente condizionano il funzionamento della risorsa).

Il diagramma a stati ha, per questa trattazione, un ruolo non funzionale e determinante nei confronti della metodologia, bensì di supporto: esso riveste uno scopo di rappresentazione immediata sia dei diversi power requirement della risorsa, e sia delle possibili transizioni da uno stato (power) all'altro. La Figura 3.5 ne fornisce un esempio generico.

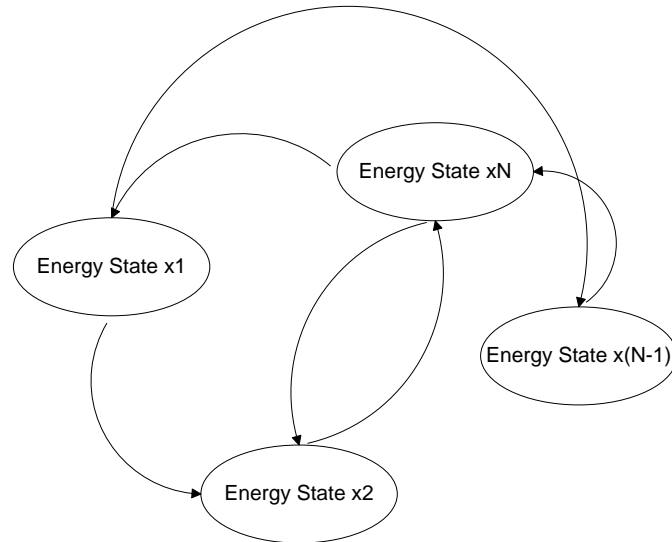


Figura 3.5: Un diagramma a stati energetici.

E' importante dunque precisare che la simulazione del modello a stati discreti e la determinazione delle probabilità di transizione sono considerate *out of scope*, dato che per la determinazione dei valori degli Energy KPI risulta sufficiente conoscere:

- in una situazione as-is (o in qualsiasi situazione di rilevazione a consuntivo), i dati di potenza [W] di ciascuno stato e il tempo di permanenza in ciascuno stato, tramite monitoraggio o stima (nel caso di sistema informativo non avanzato o non ancora predisposto per la raccolta di tali dati);
- in una situazione to-be, da stime o simulazione (che userà a tal proposito il diagramma a stati energetici assieme ad appropriati software di simulazione dei sistemi produttivi, ad esempio Arena, Simatic, ecc.)

### 3. Miglioramento delle performance energy-related

In ultima fase, gli Energy KPI, se correttamente progettati e inseriti in un sistema strutturato di implementazione guidata all'interno dell'organizzazione, abilitano il miglioramento delle performance energy-related. La clusterizzazione degli stati manifatturieri è stata eseguita in virtù dell'abilitazione di un loop di miglioramento continuo: i valori degli Energy KPI possiedono un contenuto informativo tale da

consentire un'identificazione "rapida" dei punti di debolezza e delle aree di miglioramento per quanto concerne la conduzione delle operations e il management di produzione. In questo modo si può facilmente stilare un *action plan* per il quale determinati attori all'interno dell'organizzazione sono coinvolti in obiettivi di energy saving futuri.

Per performance "energy-related" si intende -per questa trattazione- performance ad ampio spettro nell'ambito energetico: dalla figura 3.1 del research framework si nota come l'applicazione della metodologia abiliti un miglioramento diretto in termini di consumo energetico (ovvero si ottengono *energy saving*), e indiretto in termini di efficienza energetica (giacchè- come visto dalla revisione bibliografica- i KPI di EE possono dipendere da altre tipologie di misure *out of scope* per questa trattazione, quali il costo dell'energia, la domanda di mercato, ecc.).

Inoltre, essendo una metodologia integrata tra le due prospettive di time ed energy, il miglioramento si estende, oltre alle performance energy-related, anche alle performance di efficienza time-based con cui il manufacturing system viene monitorato e valutato.

### 3.2: Research Methodology

In questa sezione viene illustrata la metodologia di ricerca adottata. Si tratta di una metodologia di ricerca *qualitativa*: un tipo di ricerca che genera scoperte<sup>39</sup> a cui si perviene non attraverso procedure statistiche o altri mezzi di quantificazione. Le fonti di dati sono differenti, e possono essere l'osservazione diretta, documenti, film, dati quantitativi: esistono dunque molteplici fonti di evidenza. La ricerca qualitativa può essere realizzata principalmente attraverso tre tipologie di metodi: *Collaborative Research*, *Action Research*, e *Case Study*.

In questa trattazione, la metodologia di ricerca è la *Case Study Methodology*, dal momento che sono stati sviluppati formalmente tutti gli step di ricerca con il quale la metodologia del caso di studio è costituita: la definizione di un problema *committed*, il setting di obiettivi ulteriormente raffinabili, la letteratura in chiave di sviluppo di research gap, l'individuazione dell'unità di analisi per poi procedere con la raccolta e l'analisi dei dati, e la formulazione finale degli outline.

Di natura empirica, rappresenta uno dei metodi più comuni di ricerca nel campo dell'Operations Management. La ricerca attraverso i casi di studio ha come obiettivo quello di comprendere fino in fondo le caratteristiche di un certo problema in un contesto reale, in modo tale da "condurre a intuizioni nuove e creative, sviluppo di nuove teorie, con la conseguenza di ottenere grande validità da parte di chi mette in le mette in pratica" (Voss, 2009). La metodologia di

---

<sup>39</sup> Fonte: "Case study and qualitative research methods". Michela Arnaboldi, Politecnico di Milano.

ricerca del caso di studio è un approccio volto alla comprensione di un fenomeno che comporta e coinvolge una serie di metodologie specifiche. L'obiettivo è quello di assicurare che la ricerca sia accurata, obiettiva, imparziale; di conseguenza, trattazioni che utilizzano la metodologia del caso di studio contengono parti che descrivono e giustificano le specifiche decisioni/supposizioni/interpretazioni adottate, in modo tale da lasciar spazio a possibili opinioni.

Tradizionalmente, l'approccio consiste in una raccolta sistematica di dati empirici: il modo principale attraverso cui si raccolgono dati nella metodologia di case study è la conduzione di interviste, assieme naturalmente ad un'attenta o osservazione diretta, e alla consultazione di dati archiviati preesistenti: il processo finale *core* del case study è quello di *triangolare* queste differenti forme di dati al fine di interpretare correttamente cosa è stato scoperto concludendo con implicazioni di natura teorica e pratica.

Esistono tre tipologie di Case Study Methodology: illustrativo, esplorativo ed esplicativo. In questa trattazione, la tipologia adottata è di tipo esplorativo, dal momento che le *feature* principali del caso possono essere mutevoli nel corso della trattazione, e dal momento che il campo di lavoro e la raccolta dei dati sono effettuati prima della definizione delle research question e ipotesi. Inoltre, un caso di studio esplorativo risponde all'obiettivo di "comprendere cosa accade all'interno di un caso specifico guardando oltre le caratteristiche descrittive e studiando il contesto circostante"<sup>40</sup>, e "selezionare un caso all'interno del quale un certo fenomeno può essere studiato" che risponde a ciò che è stato fatto sviluppando la metodologia cross view in relazione ad un'area specifica all'interno del mondo della misura delle performance, attraverso la progettazione di KPI per l'analisi e il miglioramento del consumo energetico.

L'unità di analisi, come illustrato nel capitolo introduttivo, è strutturata su due livelli: in letteratura si esplora l'utilizzo e le attuali applicazioni dei KPI di EE da un livello macchina ad un livello enterprise e nazionale: l'unità di analisi può essere idealmente associata ai diversi livelli dell'Equipment Model dell'ISA-95. Dopodiché, una volta circoscritto lo scope metodologico attraverso la PMS Matrix, l'unità di analisi sarà "ridotta" al livello stabilimento. In particolare, si studierà come il consumo energetico di una macchina utensile è impattato dalla gestione delle operations e dalla gestione di produzione.

Come detto precedentemente, nel case study methodology le interviste giocano un ruolo chiave nella raccolta dei dati. Per il caso di studio della trattazione è stata realizzata un'intervista semi-strutturata, progettata in quattro sezioni distinte. La descrizione delle sezioni dell'intervista è riportata in capitolo 6, mentre

---

<sup>40</sup> Fonte: Case study as a research method, Zaidah Zainal, 2007.

le singole domande progettate per ciascuna sezione sono riportate in Appendice C a pag. 243.

L'intervista ad esperti del settore della meccanica e della produzione industriale assume per questa trattazione un ruolo di validazione qualitativa. Essa, apportando informazioni "esterne" rispetto a quelle ottenibili dalla letteratura, è in grado di:

- confermare o smentire delle ipotesi fatte nel corso della trattazione;
- chiarire alcuni punti riguardanti le esigenze dell'industry di riferimento per il quale risulta necessario un confronto esterno;
- confermare la rilevanza della metodologia per l'industry selezionata, i suoi driver di applicazione, i benefici, le barriere, ecc.;
- raffinare stati energetici, stati manifatturieri, cross view, ed elementi puntuali sviluppati nel corso della metodologia.

L'intervista è dunque utilizzata per poter raffinare la trattazione ne suo complesso attraverso il contributo delle informazioni ottenute, e apportare un feedback importante per la comprensione di come la metodologia progettata possa essere implementata in una realtà aziendale.

Alle figure intervistate è stata preventivamente fornita una presentazione dell'elaborato contenente gli elementi principali della trattazione che la validazione qualitativa ha successivamente permesso di rifinire. In questo modo la persona intervistata assimila con chiarezza il research topic e i passi logici della metodologia, e conseguentemente si garantisce una maggior qualità e accuratezza delle risposte fornite.

Arrivati allo step finale di implementazione del sistema di KPI, sono stati elaborati alcuni "findings" emersi nel corso della elaborazione della metodologia, effettuata in capitolo 5. Un caso di studio supporta la validazione qualitativa, consentendo di triangolare i dati raccolti e aiutare a supportare i finding emersi.

## Capitolo 4 : SISTEMA di MISURA delle PERFORMANCE di EFFICIENZA ENERGETICA

Il seguente capitolo si propone di fornire una risposta alla RQ1 così formulata: *“In che modo le performance di efficienza energetica di uno stabilimento di produzione discreta possono essere efficacemente comprese, misurate e ulteriormente sviluppate dalle aziende manifatturiere?”*

Le RO ad esse relative, trattate nel capitolo seguente, sono:

RO1: Proporre un Performance Measurement System (PMS) multidimensionale e scalabile di efficienza energetica, progettato per essere standardizzabile e flessibile in termini di applicabilità all'interno dell'industry del discrete Manufacturing.

RO2: Utilizzare il framework proposto per circoscrivere al suo interno l'area maggiormente critica in termini di esigenza di un *tool* a supporto del decision making nell'Energy Management, a cui la RQ2 verrà riferita.

Il capitolo 4 si articola nelle tre sezioni: 4.1: *Background* teorico, 4.2: *Progettazione di un PMS Matrix di efficienza energetica*, e 4.3: *Utilizzo del PMS MATRIX di efficienza energetica: scope metodologico*.

### 4.1: Background teorico

#### 4.1.1: Progettazione e implementazione dei PMS

Conoscere quali siano le caratteristiche e le peculiarità di un PMS –e soprattutto le caratteristiche e le peculiarità che un PMS dovrebbe apportare ad un'organizzazione- consente di conoscere conseguentemente delle ottime linee guida in sede di progettazione del PMS di EE.

Grabot (1998) afferma come un PMS venga definito nel rispetto di un obiettivo globale, e fornisce uno o un set di espressioni [misure] di performance al fine di quantificare la soddisfazione di questo obiettivo. Generalmente, l'obiettivo globale è scomposto in obiettivi elementari lungo i livelli dell'organizzazione (strategico, tattico, e operativo). Questo modello di scomposizione/aggregazione può costituire un supporto al decision-making. Occorre infatti considerare l'esistenza di un limite dei decision-maker nella capacità di processare un ampio set di misure di performance. In particolare, i link stabiliti tra le performance complessive e quelle elementari consentono la spiegazione e la diagnosi della soddisfazione degli obiettivi in accordo alle differenti performance ad essi relativi



e scegliere conseguentemente le azioni di miglioramento da avviare (Cliville, 2004).

Nella sezione 2.1: *Misurazione delle performance*, in cui sono state esplorate una serie di definizioni per quanto concerne il topic “PMS” si è giunti alla conclusione che la differenza tra un PMS e la misurazione delle performance risiede nel fatto che quest’ultima viene implementata attraverso *strumenti* che abilitino la misurazione delle performance stesse attraverso un set di metriche, mentre un PMS richiede per il suo sviluppo e la sua implementazione un approccio strutturato e dinamico che sia applicato al set di misura in uso e che viene riassunto da Bourne et al. (2000) in una serie di punti (si veda pag. 24). M. Bourne (1999), nel lavoro “Designing and implementing a balanced Performance Measurement System”, descrive le tre macrofasi di progettazione e implementazione di un PMS sviluppate e testate dall’Università di Cambridge, che sono:

1. la definizione degli obiettivi di business;
2. la progettazione delle misure di performance;
3. la gestione attraverso la misurazione

L’autore evidenzia gli aspetti chiave del processo di gestione di ognuno di questi step, elaborati e riportati in

Figura 4.1, e successivamente descritti.

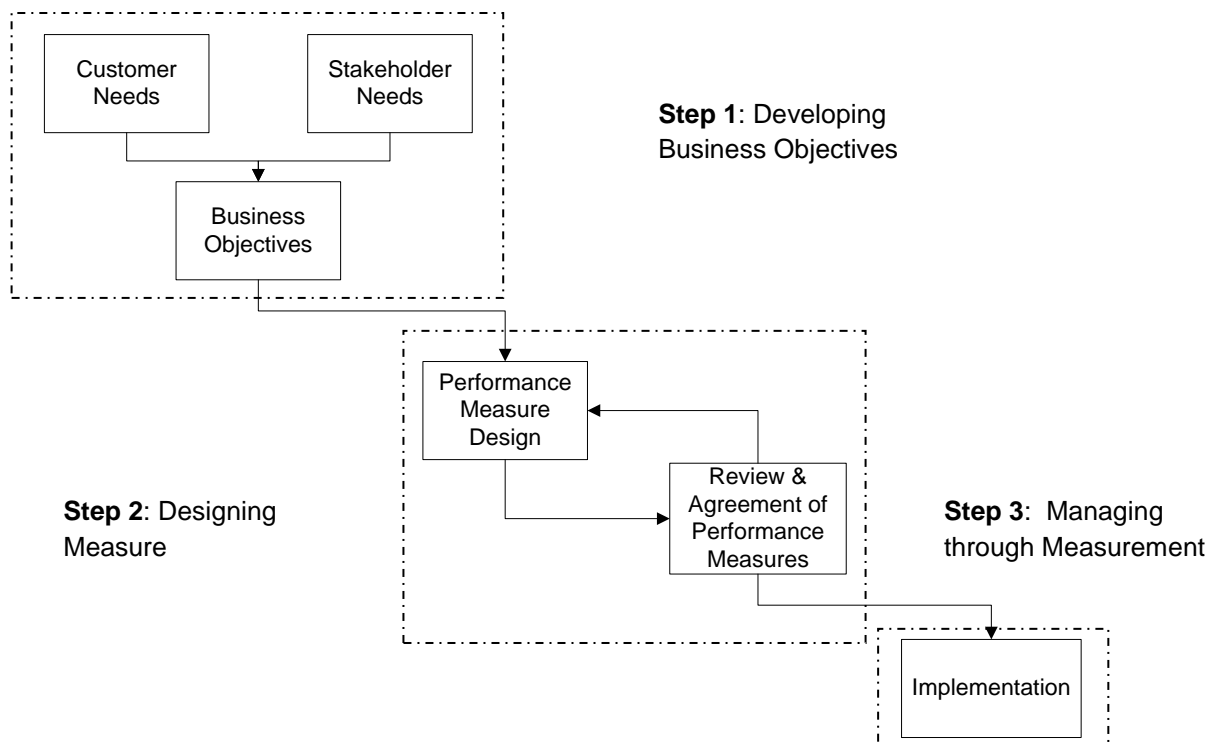


Figura 4.1: Three steps in designing and implementing a Performance Measurement System. Fonte: Bourne, 1999, adapted from Fitzgerald et al., 1991.

## 1. definizione degli obiettivi di business

Il primo step, ovvero la definizione –o chiarificazione- degli obiettivi di business, è effettuata considerando le esigenze di due gruppi di attori: i clienti e gli stakeholder dell'impresa.

I requisiti normalmente considerati in riferimento ai clienti sono qualità, tempo, costo/prezzo e flessibilità. E' chiaro che il requisito, analogamente ad un buon critical success factor o key performance indicator, deve essere specifico, non vago: un requisito come "alta qualità" non ha senso e significato applicativo, mentre "conformità alle specifiche del cliente" è considerata come una buona formulazione di un requisito. Oltretutto, dal momento che non si può eccellere in ogni area di performance, i requisiti del cliente possono essere indicati, in sede di analisi strategica, come *order winner* o *qualifier*, in funzione del vantaggio competitivo che si ottiene all'aumentare (o diminuire) del livello di performance in una certa area di interesse (Portioli Staudacher, 2011) (ad esempio, nella produzione di commodity di vario tipo il prezzo è considerato come *order winner*, mentre la qualità di conformità può essere un *qualifier*).

Occorre anche considerare le esigenze di tutti quegli stakeholders interessati al futuro dell'organizzazione, solitamente rappresentati da gruppi quali i proprietari dell'organizzazione, il management, i fornitori, i dipendenti e la comunità locale.

E' chiaro che alcuni dei requisiti formulati da clienti e dagli stakeholder risulteranno allineati (ad esempio l'affidabilità del prodotto, importante sia per il cliente che per l'azienda, se ci si riferisce all'obiettivo congiunto di minimizzazione dei costi di garanzia) e altri invece in conflitto (ad esempio la velocità delle consegne che può andare a cozzare con l'obiettivo dell'azienda di minimizzazione dello stock).

L'autore suggerisce di sviluppare la lista degli obiettivi di business assegnandone le priorità, per poi procedere allo step 2 di progettazione delle misure di performance: infatti, stabilire i soli obiettivi di business non è sufficiente, in quanto occorre stabilire misure che sappiano quantificare il grado di raggiungimento dell'obiettivo.

## 2. progettazione delle misure di performance

Nello step successivo l'autore propone di inserire le differenti misure proposte all'interno di un record sheet dettagliato in *purpose, target, formula, etc.* Questa fase tratta in pratica il concetto di dettaglio dei KPI in attributi esplicito a pag.21 dove, tra i diversi riferimenti bibliografici analizzati viene suggerito, per questo proposito, l'utilizzo di uno schema simile a quello proposto dallo standard ISO 22400 (**Error! Reference source not found.**). Un aspetto importante sollevato da Bourne e non evidenziato precedentemente è quello di rivedere nel tempo la misura proposta domandandosi quali siano i comportamenti derivati

dall'introduzione di questo tipo di misura e se questi comportamenti risultino effettivamente utili, e oltretutto valutare le misure non solo in termini stand-alone ma anche in termini di equilibrio sulla strategia complessiva, valutando dunque gli eventuali conflitti e trade-off.

### 3. gestione attraverso la misurazione

Nello step 3: gestione attraverso la misurazione l'autore mette in luce l'importanza dell'effort del management nella programmazione di meeting periodici che vedono riuniti attori che vanno dal top management al livello operativo discutere delle misure proposte, di eventuali revisioni, delle azioni messe in atto. In particolare, risulta molto utile stabilire una metodologia di analisi delle performance e di assegnazione delle priorità alle azioni. Oltretutto, in questa fase, risulta coinvolta la visualizzazione del dashboard di indicatori a tutti gli attori interessati, e il chiaro collegamento tra migliori (o peggiori) risultati ottenuti e rilevati tramite le misure e bonus/incentivi e remunerazioni assegnate in funzione.

Questo schema di riferimento per la progettazione di un PMS articolato nei suoi tre step viene utilizzato:

- sia per lo sviluppo della RO1 in qualità di *fil rouge* di base necessario per la progettazione di un PMS (nel caso in questione ,di EE);
- sia come linea guida per la RO3 in capitolo 5, dal momento che essa si propone di sviluppare nuovi Energy KPI attraverso la metodologia cross view, che saranno successivamente inseriti formalmente in un sistema di gestione dei KPI in ottica di continuous improvement delle performance.

#### **4.1.2: Definizione e selezione dei Key Performance Indicator**

Giacché il research topic del processo di definizione e selezione degli indicatori di EE da parte delle aziende è stato ampiamente trattato in letteratura da diversi studiosi (si veda Muñoz-Lopez, 2010; Bauer, 2004; Neely,1999) e non costituisce il *core* metodologico della trattazione, sono state utilizzate una serie di fonti bibliografiche fortemente orientate a tale topic per la trattazione di questo primo step.

Il motivo per il quale si ritiene opportuno illustrare il processo di definizione e selezione degli indicatori risiede nella logica stessa con il quale lo "strumento" dell'indicatore è stato concepito: esso, qualsiasi sia l'applicazione (economica, energetica, ecc.) non può essere definito arbitrariamente ma deve inserirsi all'interno di una successione logica top-down illustrata in Figura 4.2.



Figura 4.2: "Strategic Algnment Pyramid". Fonte: Bauer, 2004.

Secondo l'autore, i KPI altro non sono che la diretta conseguenza di un processo di investigazione interna su vision, strategia, obiettivi e aree all'interno delle quali si vuole focalizzare, e delle quali si vogliono monitorare le performance.

Anche Muñoz-Lopez (2010) riconosce l'importanza di questa prima fase di un PMS di EE, dal momento che non esistono misure standard o KPI standard applicabili a tutte le aziende: gli indicatori che l'azienda adotta per misurare le proprie performance di EE devono essere allineati agli obiettivi che l'azienda si prepone. Si riportano per punti le conclusioni tratte dall'autore per un buon processo di definizione e selezione degli indicatori:

- il processo di selezione non può partire prima di non aver formalizzato in maniera chiara il gruppo di lavoro che si occuperà del processo di selezione degli indicatori e le figure responsabili. Molto spesso programmi di miglioramento non danno i loro benefici proprio perché l'organizzazione non riconosce delle figure responsabili, e si tende così ad attribuire le responsabilità ad altre aree.
- Una volta selezionato il team di lavoro, tutte le persone del team devono essere attivamente coinvolte nella definizione di obiettivi e *goal*, dal momento che parte delle figure del team sarà chiaramente responsabile dei risultati ottenuti e monitorati dagli indicatori selezionati.
- Gli obiettivi di EE devono essere collegati agli obiettivi generali (strategici), e l'approccio condotto nel raggiungimento degli obiettivi deve garantire l'ottenimento di buone performance sia nel presente che nel futuro.

- Gli indicatori selezionati devono essere SMART (si veda paragrafo 2.1.2: Key Performance Indicator), qualitativi e quantitativi, semplici da comprendere per le persone coinvolte nel programma di misura e valutazione delle performance.
- E' importante definire lo *scope* degli indicatori di EE (o più propriamente, dei processi dei quali i KPI monitoreranno le performance) e i livelli decisionali coinvolti all'interno della valutazione dei valori di tali indicatori (si veda la dimensione di decision making di classificazione degli indicatori in revisione bibliografica dei KPI di EE).
- Includere all'interno dei KPI selezionati KPI che consentano il confronto tra organizzazioni diverse per abilitare un benchmarking.

## 4.2: Progettazione di un *PMS Matrix* di efficienza energetica

Poiché la gap analysis ha evidenziato l'esigenza di sistemi di misura delle performance multilivello, il PMS verrà progettato secondo un approccio multidimensionale, all'interno del quale le aziende possono comprendere e collocare in maniera trasparente gli indicatori selezionati. Il PMS Matrix consente di inquadrare le sue "celle" in una prospettiva di sviluppo degli Energy KPI relativi a ciascuna cella. La "cella" di riferimento verrà selezionata sulla base delle informazioni apportate dalla gap analysis, mentre per le altre si forniranno possibili soluzioni aperte a sviluppi futuri.

### 4.2.1: Inizializzazione framework: KPI tester

E' necessario che il PMS di EE, chiamato *PMS Matrix* per via della sua natura multidimensionale con la quale verrà progettato, contenga un numero limitato di indicatori, selezionati secondo le linee guida precedentemente esposte. Dal momento che i singoli KPI di EE inseriti all'interno del PMS progettato hanno per questa trattazione una funzione esclusivamente *a supporto* dell'illustrazione del framework stesso e non costituiscono una parte *core* della ricerca che ci si propone di svolgere (come lo sarebbe invece sviluppare un framework concettuale per proporre KPI di EE ad aziende di una certa industry), si immagina di derivare i KPI di EE secondo un processo autonomo di formulazione di una possibile strategia, possibili Critical Success Factors (CSF) e possibili KPI ad essi relativi.

Come evidenziato nel paragrafo introduttivo, l'attenzione delle aziende (in particolare quelle dell'industry del Manufacturing) verso i temi di sostenibilità è accresciuta considerevolmente nel tempo: il risultato di questa attenzione

crescente è l’inserimento del tema della sostenibilità perfino nelle linee strategiche aziendali.

Un esempio di strategia generale può essere *“mantenere e guadagnare nel tempo una posizione leader nel mercato in tutti i business di attività al fine di conseguire una crescita sostenibile e aumentare il valore d’impresa, venendo incontro e sfruttando gli attuali trend di cambiamenti demografici e climatici, la globalizzazione e l’urbanizzazione”*.

Si immagina a questo punto che l’azienda abbia circoscritto specifiche aree nelle quali essa agisce per poter soddisfare obiettivi coerenti con la strategia formulata. Tali aree possono essere ad esempio i costi operativi, i requisiti posti da normative, e l’efficienza di sistema: gli obiettivi per esse formulate possono dunque essere:

- la riduzione dei costi operativi
- venire incontro a specifici requisiti di standard/piani regolatori
- migliorare l’efficienza di sistema.

Una formulazione di CSF relativa a questi obiettivi può essere riassunta in *“occorre far bene queste cose per avere per avere successo”*<sup>41</sup>.

A questo punto può cominciare la selezione dei KPI tester per il PMS proposto. Anche se formulata per un obiettivo di definizione di gap analysis, la review esaustiva dei KPI di EE condotta a paragrafo 2.2.2 a partire da pag.69 consente di disporre di una valida overview degli indicatori più appropriati da scegliere. La natura degli obiettivi formulati e delle CSF mostra di per sé quale sarà la categoria di KPI di EE da selezionare: in particolare, risultano allineati agli obiettivi formulati gli indicatori di tipo economico, economico-fisico, eco-efficiency, fisico termodinamico. Selezionare gli indicatori da un panel variegato di tipologie consente di ottenere un tester onnicomprensivo ed esente da ridondanze.

La Tabella 4.1 mostra i KPI tester. La struttura della tabella è analoga alla struttura utilizzata per la review dei KPI di EE.

Tabella 4.1: KPI di EE tester.

Tipologia di KPI	KPI di EE	Descrizione/Calcolo	Unità di mis.	Livello aggr.	Scale	Obj
Economico	Energy costs based on total costs	$\frac{\text{Cost of energy consumption}}{\text{Total production cost}}$	[%]	Disaggregato	Enterprise Site	min

<sup>41</sup> Fonte: Open Sustainability: the open source framework for Sustainability. [http://www.opensustainability.org/wiki/Overall\\_Business\\_Strategy\\_for\\_Sustainability](http://www.opensustainability.org/wiki/Overall_Business_Strategy_for_Sustainability)

Economico-fisico	Energy costs per unit of production	$\frac{\text{Cost of energy consumption}}{\text{Units of production}}$	[ $\frac{\text{€}}{\text{unit}}$ ]	Disaggregato	All	min
Fisico termodinam.	Energy consumed per product	$\frac{\text{Final energy consumption}}{\text{Units of production}}$ Dove l'energia finale può essere rappresentata sia dall'energia elettrica, che acqua o gas.	[ $\frac{\text{J or m}^3}{\text{unit}}$ ]	Disaggregato	All	min
Eco-efficiency	GHG Emission	-	[kg or ton]	Aggregato	Enterprise Site	min

Si procede ora con la progettazione vera e propria del PMS Matrix.

#### 4.2.2: Inizializzazione framework: dimensioni di progettazione

Ai fini di una maggior applicabilità del PMS sono stati formulati dei requisiti derivanti dal senso comune di una buona progettazione di un framework di PMS. I requisiti sono articolati in due punti:

1. gli indicatori devono essere riferiti a *processi* e *livelli di misura* indicati secondo una terminologia standard e univoca ai fini di una miglior applicabilità del PMS in organizzazioni differenti, ma anche ai fini di una maggior chiarezza per gli utilizzatori del modello stesso;
2. Il set di *processi* e dei *livelli di misura* preso in considerazione dal modello deve essere sufficientemente ampio, flessibile, e generico in modo da poter essere applicato ad un numero piuttosto vasto di stabilimenti di produzione diversi e con caratteristiche diverse

Le dimensioni di progettazione che si reputa soddisfino pienamente questi requisiti sono qualitativamente caratterizzate da:

1. un Process Reference Model (PRM) –che fornisca un'architettura strutturata e standard dei *processi* di gestione delle aziende a cui gli indicatori si riferiscono;
2. un Equipment Model –che descriva l'architettura fisica dello stabilimento attraverso una serie di livelli di misura definiti in questa trattazione come *scale* a cui gli indicatori si riferiscono.

Mentre l'Equipment Model, fornito dallo standard ISA-95, è stato ampiamente trattato nell'ambito della definizione dello *scale* dei KPI di EE revisionati in letteratura (pag.51), il PRM necessita di essere definito in maniera più approfondita.

La ragione per cui il PRM sia una base ideale su cui costruire un PMS risiede nel suo scopo e nelle sue caratteristiche: lo scopo di un PRM, o di un *business*

*process framework* è la capacità di descrivere l'architettura dei processi in modo che abbia senso anche verso i business partner chiave (Berrah & Cliville, 2007)<sup>42</sup>. Un PRM è caratterizzato da:

- una descrizione standard dei processi di gestione;
- un framework delle relazioni tra i processi standard;
- metriche standard per misurare le performance dei processi;
- pratiche di gestione che producono le performance best-in-class;
- un allineamento standard tra caratteristiche e funzionalità.

Esso è utile specialmente per descrivere le catene del valore che incrociano divisioni e organizzazioni multiple, e per fornire un linguaggio comune per gestire questi processi. Un PRM può essere un potente strumento di gestione. Una volta che un processo di gestione complesso è mappato all'interno di un PRM standard, esso può essere misurato, gestito e controllato. Esso può essere anche adattato e riadattato per raggiungere un obiettivo specifico o per ottenere un vantaggio competitivo.

Il modello Supply Chain Operations Reference (SCOR) è indicato in letteratura come PRM, e in quanto tale risponde all'esigenza di standardizzazione evidenziata precedentemente nel punto "1". Il modello SCOR è uno strumento di misurazione delle performance logistiche per il Supply Chain Management (SCM) applicabile ad ogni settore industriale, e perciò risponde pienamente all'esigenza di flessibilità evidenziata precedentemente nel punto "2". A riprova della sua efficacia nella rappresentazione dei processi, altri framework teorici sviluppati in letteratura, seppur con obiettivi diversi dagli obiettivi diversi da questa trattazione, hanno usufruito del modello SCOR in sede di progettazione (si veda ad esempio Gunasekaran, Patel, & Tirtiroglu, 2001; Gunasekarana, Patelb, & McGaugheyc, 2004).

Le due dimensioni di progettazione sono costituite da un opportuno livello del modello SCOR e dai livelli dell'Equipment Model dell'ISA-95. Il modo in cui esse si inseriscono all'interno del PMS definendone la struttura viene chiarito nei due paragrafi successivi.

#### **4.2.3: Prima dimensione: Livello 1 modello SCOR**

Il modello è stato sviluppato dal Supply Chain Council, un'organizzazione no-profit che comprende circa 700 imprese impegnate a sviluppare e condividere le buone pratiche nella gestione della catena logistica. L'appartenenza al Supply

---

<sup>42</sup> Per semplificare la bibliografia di questa sezione si precisa che le informazioni riportate per questa descrizione del modello SCOR provengono tutte dal sito web [www.supplychain.org](http://www.supplychain.org) e dalle link delle pagine del sito web, mentre qualora le informazioni provengano da articoli accademici verrà riportato come di consueto il relativo paper.



Chain Council è aperta a tutte le imprese ed organizzazioni interessate all'applicazione e al miglioramento della gestione della Supply Chain (SC). A far parte del Supply Chain Council sono soprattutto professionisti (40%), seguiti da providers tecnologici (25%), consulenti (20%) e università, associazioni ed organizzazioni governative (16%). Esso è progettato con l'obiettivo di sviluppare un tool standard per misurare, valutare e migliorare le performance della SC. Attualmente il modello è nella sua decima versione.

Per poter comprendere l'applicazione del modello SCOR all'interno di un PMS di EE è necessario riportare una prima e generica descrizione del modello, in particolare sul modo in cui il Supply Chain Council ha modellato i processi della SC.

Il modello SCOR integra i ben noti concetti del Business Process Reengineering (BPR), del benchmarking, della misura dei processi all'interno di un framework cross-funzionale, ovvero:

- il business process reengineering fotografa lo stato dei processi attuali (as-is) e derivare i processi futuri desiderati (to-be);
- il benchmarking quantifica le performance operative di imprese simili e stabilisce i target basati sui best-in-class;
- la best practices analysis caratterizza le pratiche di gestione e le soluzioni informatiche dei best-in-class.

Il modello inoltre descrive le pratiche di gestione e le soluzioni software che risultano dalle performance best-in-class.

Il PRM dello SCOR contiene:

- *Processes*: descrizioni standard dei processi di gestione e un framework di relazioni tra processi;
- *Performance Metrics*: metriche standard che misurano le performance dei processi;
- *Practices*: pratiche di gestione che producono le performance best-in-class;
- *People*: requisiti di skill e training allineati con i processi, le best practice e le metriche.

I confini dello SCOR i confini si estendono “dai fornitori dei fornitori ai clienti dei clienti”, come si può vedere in **Error! Reference source not found.** Figura 4.3.

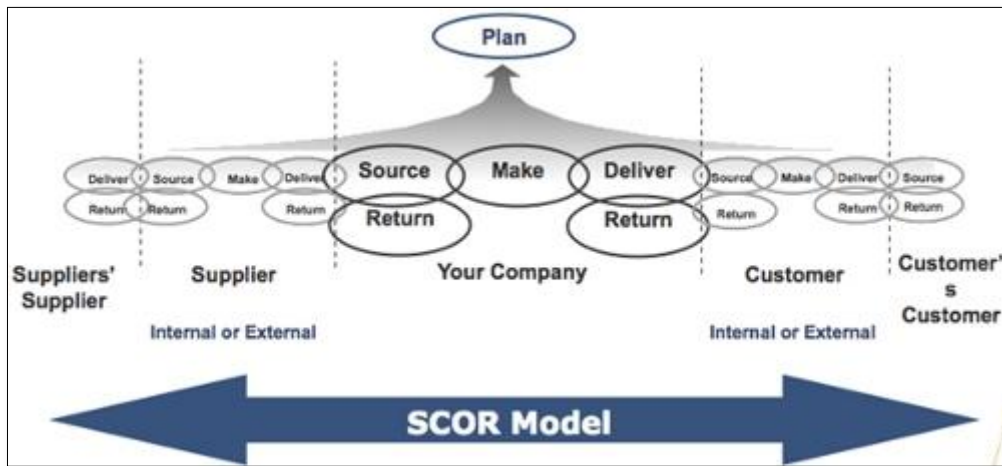


Figura 4.3: I processi del modello SCOR lungo la SC. Fonte: Supply Chain Council.

All'interno dello SCOR sono incluse:

- tutte le interazioni con i clienti dall'emissione dell'ordine all' emissione della fattura;
- tutte le transazioni dei prodotti (sia si tratti di materiale fisico che di servizi) inclusi impianti, forniture, spare parts, software, ecc
- tutte le interazioni col mercato, dalla comprensione della domanda aggregata alla soddisfazione di ogni ordine.

Lo SCOR non descrive ogni singolo processo di business o attività, e non è rivolto al:

- marketing e vendite (generazione della domanda);
- research and technology development;
- sviluppo del prodotto;
- alcuni elementi del supporto al cliente post-vendita.

Lo SCOR presuppone, ma non tiene conto in maniera specifica del training, della qualità, dell' information technology e dell'amministrazione.

Ad ogni modo, a riprova della flessibilità del modello, vale la pena sottolineare che è possibile effettuare dei link ai processi non inclusi all'interno dello scope del modello.

Data la vastità delle applicazioni/possibilità di utilizzo che il modello SCOR offre è necessario specificare quale sia l'area di copertura dello SCOR selezionata per l'utilizzo all'interno del PMS: poiché il modello viene utilizzato in questa trattazione per avere una base standard e flessibile di rappresentazione dei processi ai quali vengono riferiti i KPI di EE viene escluso dunque l'utilizzo dello SCOR ai fini del BPR e della lbest practices analysis.

Coerentemente con quanto appena detto, dei quattro elementi costituenti il PRM, si considerano *in scope* esclusivamente i processi (*Processes*). Seppur all'interno del modello SCOR, la rappresentazione gerarchica dei processi sia identica alla

rappresentazione delle metriche/misure di performance (*Performance Metrics*), si considerano i soli *Processes* dal momento che le metriche sono, per questa trattazione, i KPI tester che saranno associati ai Processi, e non invece le metriche definite dal modello che trattano performance di efficienze ed efficacia intra/inter logistica.

Lo SCOR ha natura gerarchica, interattiva e interconnessa: nella metodologia SCOR le metriche e i processi sono sviluppati su quattro livelli in cui il successivo rappresenta la scomposizione del precedente. Le metriche al Livello 1 sono di tipo strategico, con misure ad alto livello che attraversano i molteplici processi dello SCOR. Le metriche di basso livello sono associate ad un numero più ristretto di sottoinsiemi di processi.

Il metodo gerarchico di decomposizione dei processi è reso ben comprensibile in Figura 4.4.

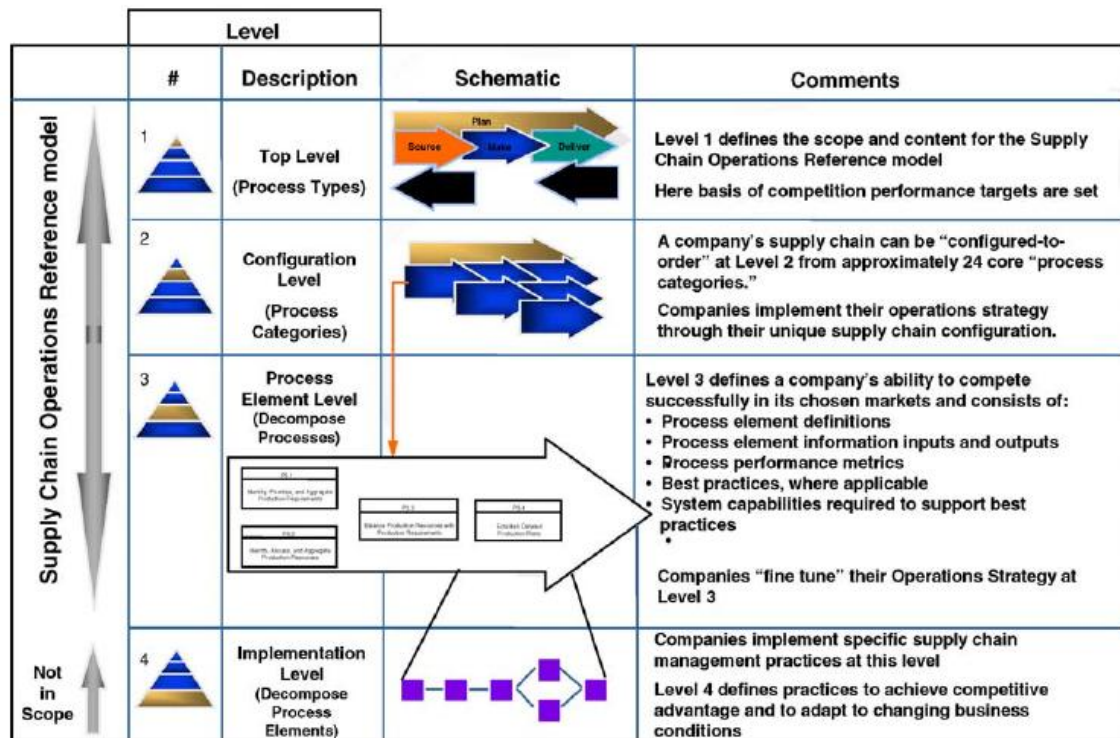


Figura 4.4: I livelli di processo del modello SCOR. Fonte: Stephens, 2001.

Il Top Level (Livello 1) è costituito da cinque tipi di processo: *Plan*, *Make*, *Source*, *Deliver*, e *Return* (Figura 4.5 **Error! Reference source not found.**).  
 Mediante successioni di questi processi, è possibile descrivere lo scopo e la configurazione ad alto livello di qualsiasi SC, indipendentemente dal settore industriale di riferimento.

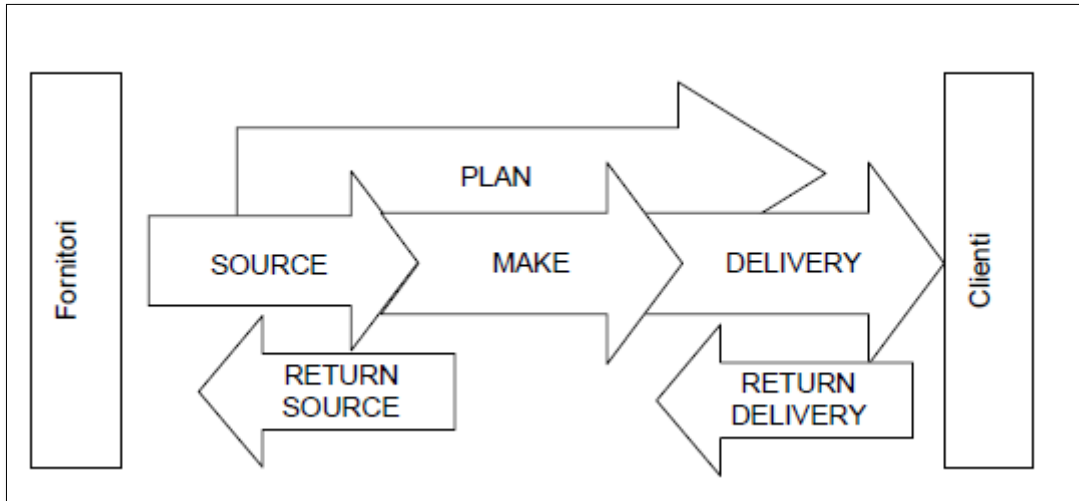


Figura 4.5: I cinque tipi di processo del modello SCOR (Livello 1), detti anche processi di gestione.

La Tabella 4.2 riporta la descrizione di ciascun tipo di processo del Livello 1. I contenuti in tabella provengono sia dal Supply Chain Council che da altri fonti bibliografiche come Gunasekarana, Patelb, & McGaughey (2004), Mazzarino et. al (2008).

Tabella 4.2: Descrizione dei cinque processi di gestione del modello SCOR.

TIPO DI PROCESSO (Livello 1)	DESCRIZIONE
<b>Plan</b>	<p>I processi del Plan descrivono le attività di pianificazione associate alle operazioni della SC, ovvero:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ gestione delle regole del business, misurazione delle prestazioni dell'intera supply chain, individuazione delle richieste dei clienti, raccolta dati sulle risorse disponibili, gestione delle scorte, degli asset, dei trasporti, configurazione delle regole di pianificazione;</li> <li>○ bilanciamento delle risorse con la domanda e le richieste dei clienti e successiva pianificazione della capacità e individuazione dei gap di risorse, definizione dei piani per l'intera supply chain e di un piano di azione finalizzato ad un miglior servizio di Source, Make, Deliver e Return.</li> <li>○ coerenza tra il piano della supply chain e il piano finanziario.</li> </ul>
<b>Source</b>	<p>I processi del Source descrivono le ordinazioni e le ricezioni delle merci e dei servizi. Essi includono problematiche quali gli ordini di acquisto, la ricezione, la validazione delle spedizioni, lo stoccaggio, la fatturazione.</p>

<b>Make</b>	<p>I processi di Make descrivono le attività associate alla conversione dei materiali o alla creazione dei contenuti dei servizi.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Esso si concentra sulla conversione dei materiali piuttosto che la produzione, perché il Make rappresenta tutti i tipi di conversione di materiale: l'assemblaggio, le lavorazioni chimiche, la manutenzione, le riparazioni, il controllo, il riciclo, il rinnovo, la rilavorazione ed altro.</li> <li>○ Questi processi vengono riconosciuti dal fatto che uno più item sono in ingresso, ed uno o più item sono in uscita dal processo.</li> </ul>
<b>Deliver</b>	<p>I processi di Deliver descrivono le attività associate alla creazione, mantenimento e realizzazione degli ordini dei clienti. Esso include la ricezione, la validazione e la creazione degli ordini dei clienti, la programmazione delle spedizioni, il prelievo, l'imballaggio e la spedizione delle merci e la fatturazione.</p>
<b>Return</b>	<p>I processi di Return descrivono le attività associate al flusso inverso dei prodotti in arrivo dal cliente.</p> <p>Il Return include l'identificazione delle esigenze di restituzione, la programmazione dei resi, le spedizioni e le ricezioni dei resi.</p> <p>E' opportuno precisare che i processi di riparazione, riciclo, rinnovamento e rilavorazione non sono descritti all'interno dei processi di Return bensì di Make.</p>

Trattandosi di un lavoro di ricerca orientato al sustainable manufacturing e all'EE, risulta appropriata la descrizione dei tipi di processo del modello SCOR anche e soprattutto nella sua "declinazione" green: il Green SCOR. Il Green SCOR è uno strumento integrato di SCM che consente agli utilizzatori di gestire la loro supply chain e gli impatti ambientali, con il risultato di operations più efficienti e costi minori. Il GreenSCOR è stato integrato nel modello SCOR a partire dalla versione 9.0, apportando modifiche che includono aspetti di tipo ambientale.

La Tabella 4.3 riporta ciascun tipo di processo descritto secondo le peculiarità del Green SCOR e il potenziale impatto ambientale derivante dall'esecuzione dei diversi tipi di processo. I contenuti in tabella provengono sia dal Supply Chain Council che da altri fonti bibliografiche come Yongan & Menghan, (2011), Logistic Management Institute (2003).

Tabella 4.3: Descrizione dei cinque processi di gestione del modello Green SCOR, con relativo impatto ambientale.

TIPI DI PROCESSO "GREEN" (Livello 1)	DESCRIZIONE	POTENZIALE IMPATTO AMBIENTALE
<b>Green Plan</b>	<p>Bilanciamento delle risorse in base alla domanda, che abilita l'esecuzione di una serie di piani di azioni per fornire un miglior servizio di green Source, green Make, green Deliver e green Return.</p> <p>Esso normalmente include le regole di business, le performance di supply chain, la raccolta di dati, le scorte, la valutazione degli asset, il trasporto, la pianificazione e la distribuzione, la gestione della domanda e dei rifornimenti, la coordinazione della pianificazione della supply chain e della unità finanziaria.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Pianificare la minimizzazione dei consumi energetici e dell'utilizzo di materiali pericolosi per la salute.</li> <li>○ Pianificare l'handling e lo stoccaggio dei materiali pericolosi.</li> <li>○ Pianificare lo smaltimento dei materiali comuni e di quelli pericolosi.</li> <li>○ Pianificare la conformità di tutte le attività della supply chain</li> </ul>
<b>Green Source</b>	<p>Acquistare materie prime e semilavorati "green" da fornitori valutati.</p> <p>Ciò consiste nell'identificazione e selezione delle fonti di fornitura, lo sviluppo di piani di spedizione, l'esame delle merci.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Selezione dei fornitori con documentazioni e dati positivi dal punto di vista ambientale.</li> <li>○ Selezionare materiali dal contenuto <i>environmentally friendly</i></li> <li>○ Specificare i requisiti del package.</li> <li>○ Specificare i requisiti della consegna al fine di minimizzare i requisiti del trasporto e della movimentazione.</li> </ul>

<p><b>Green Make</b></p>	<p>E' diviso in tre tipi: make-to-order, assemble-to-order, e engineering-to-order.</p> <p>La produzione deve essere effettuata in linea con un'idea <i>environmental friendly</i>. Esso include la formulazione dello schedule di produzione e specificatamente l'implementazione del piano di produzione.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Effettuare uno scheduling di produzione per minimizzare i consumi energetici.</li> <li>○ Gestire lo spreco generato durante i processi di Make.</li> <li>○ Gestire le emissioni (di aria e di acqua) dal processo di Make.</li> </ul>
<p><b>Green Deliver</b></p>	<p>Esso gestisce i vari prodotti includendo i compiti relativi agli ordini, stoccaggio e trasporto.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Minimizzare l'uso di materiale per il packaging.</li> <li>○ Schedulare le spedizioni con l'obiettivo di minimizzare i consumi di carburante.</li> </ul>
<p><b>Green Return</b></p>	<p>Questo processo include i resi di materie prime e i resi dei clienti che si hanno rispettivamente in caso di prodotti difettosi inoltrati dal cliente o prodotti rimanenti da mandare al fornitore. Le parti che possono essere riciclabili per il riuso vengono mandate ai produttori. Esso consente il riciclo sia dei materiali che degli scarti di smaltimento.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Schedulare il trasporto e aggregare le spedizioni per minimizzare i consumi di carburante.</li> </ul>

Si conclude stabilendo come i diversi tipi di processo costituenti il Livello 1 del modello SCOR, in particolare declinato nella sua prospettiva *green*, il Green SCOR costituiscano un'ottima soluzione per la progettazione della prima dimensione del framework concettuale di un PMS di EE, atta a rappresentare i processi di un sistema manifatturiero estendibile da quello complessivo di una SC a quello di una singola fabbrica. Per ciascun livello possono essere associati KPI e metriche relative a "quanto bene" viene condotto il tipo di processo green, ad esempio KPI che descrivano l'impatto ambientale delle spedizioni, o

dell'energia utilizzata acquistata da un certo fornitore, ecc. L'applicazione del Livello 1 del modello all'interno del framework verrà definita nel dettaglio nel momento in cui il framework verrà illustrato in maniera esaustiva (4.3: *Utilizzo del PMS MATRIX* di EE) previa definizione della sua seconda dimensione di progettazione.

#### 4.2.4: Seconda dimensione: Equipment Model standard ISA-95

Per la descrizione dello standard ISA-95 si rimanda al paragrafo 2.2.1: *Dimensioni di classificazione dello stato dell'arte dei Key Performance Indicator di efficienza energetica* a pag.57, giacché lo standard è stato ampiamente trattato nell'ambito della definizione dello *scale* a cui riferire i KPI di EE in sede di classificazione. Lo standard ISA-95 - definito in prima battuta all'interno dell'IEC 62264-1 (IEC, 2003), e successivamente esteso dall'ISA (ANSI/ISA-95.00.01-2010) riveste anche in questo caso la stessa funzione svolta nel capitolo 2, seppur in un'applicazione diversa: esso definisce all'interno del framework del PMS lo *scale* di misura delle performance di EE tramite l'Equipment Model (Figura 4.6).

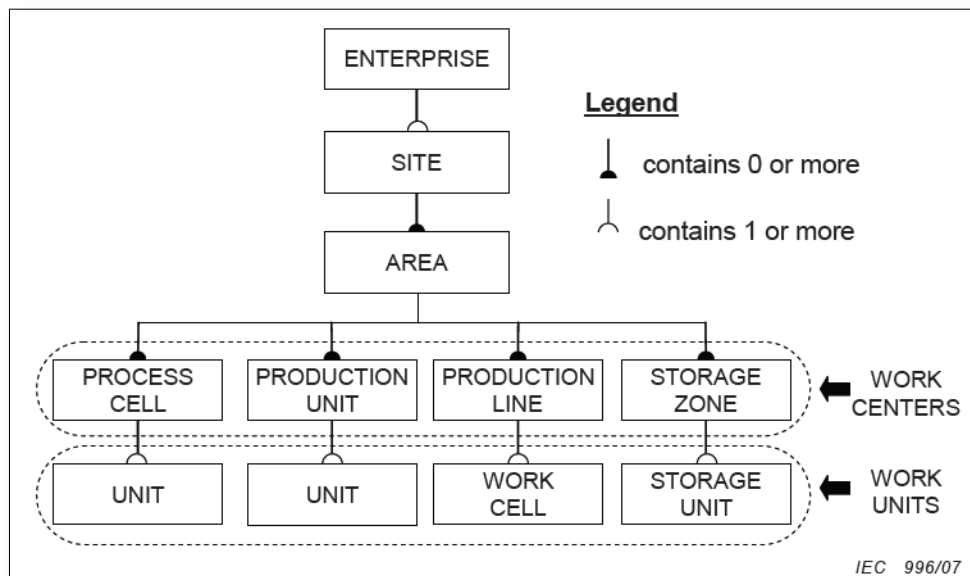


Figura 4.6: Equipment Model. Fonte: ISA-95, from IEC 62264-1.

Come si evince dalla figura, l'organizzazione in gruppi al livello più basso è combinata a quelli di livello più alto all'interno della gerarchia. In alcuni casi, un raggruppamento all'interno di un livello può essere incorporato all'interno di un altro gruppo presente allo stesso livello, secondo una struttura ricorsiva. Il modello può essere collassato o espanso a seconda delle specifiche applicazioni. Ad ogni modo, deve esserci almeno un sito all'interno di un'impresa, almeno un work center in un'area (o sito, se l'area è collassata in esso) e almeno una work unit all'interno di un work center. In questa applicazione, analogamente a quanto fatto nel capitolo 2, l'"area" viene trascurata in quanto ridondante.



Inoltre, poiché l'Enterprise fa riferimento a più siti produttivi, in ottica di un inserimento all'interno di un framework basato anche sullo SCOR Model, Enterprise indicherà i molteplici siti produttivi non solo dell'azienda stessa ma – per questa trattazione- anche della SC.

Ponendo come seconda dimensione di classificazione lo standard ISA-95, è possibile associare ogni KPI di EE ad un livello di dettaglio che va dall'impresa nel suo complesso (Enterprise), alla singola stazione operativa (Work Unit).

### 4.3: Utilizzo del PMS MATRIX di efficienza energetica: scope metodologico

Si perviene infine allo sviluppo del PMS di EE tramite la “composizione” delle due dimensioni, al fine di costruire una struttura multilivello, multidimensionale, e scalabile (Tabella 4.4). Assieme ai KPI tester sono stati aggregate anche le metriche del Green SCOR disponibili dalla letteratura, giacché nel corso della trattazione tale PRM è stato rilevato come PRM ideale per un'applicazione di questo tipo.

Tabella 4.4: Framework Concettuale di PMS di efficienza energetica.

	PMS EE MATRIX			
	EQUIPMENT MODEL ISA-95			
LEVEL 1 Green SCOR	Scale misure EEE			
Processi in MS	Enterprise	Site	Work Center	Work Unit
Green Plan	<ul style="list-style-type: none"> <li>Carbon and Environmental Footprint (in fase di formulazione del SCC)</li> <li>Compliance Costs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Emission Cost per Unit</li> <li>Energy costs based on total costs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Energy costs based on total costs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Energy costs based on total costs</li> </ul>
Green Source	<ul style="list-style-type: none"> <li>% Supplier contracts negotiated meeting target terms and conditions for quality, delivery, flexibility and cost</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sourcing Costs as a % of Product Acquisitions Costs</li> <li>% of suppliers with an EMS or ISO 14001 certification</li> </ul>		
Green Make		<ul style="list-style-type: none"> <li>GHG Emissions</li> <li>Waste produced as per cent of product produced</li> <li>Energy Consumed per product</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Waste produced as per cent of product produced</li> <li>Energy Consumed per product</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Waste produced as per cent of product produced</li> <li>Energy Consumed per product</li> </ul>
Green Deliver	<ul style="list-style-type: none"> <li>% of carriers meeting environmental</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>% of carriers meeting environmental</li> </ul>		

	criteria ●Fuel costs as per cent of Deliver costs	criteria ●Fuel costs as per cent of Deliver costs		
Green Return	●Products returned as percent of products delivered ●Return products disposed of vs. remanufactured	●Products returned as percent of products delivered ●Return products disposed of vs. remanufactured		

E' importante sottolineare come il PMS proposto non costituisca un framework concettuale, dal momento che il Livello 1 del modello SCOR non viene utilizzato in tutta la sua natura "completa" di interconnessione tra i diversi processi (ad esempio il plan make, plan source, ecc.) ma venga utilizzato solo ai fini di una classificazione standard di processi *macro* sviluppati oltretutto in ottica *green*.

A questo punto entra in gioco l'individuazione di uno *scope* all'interno del quale la RQ2<sup>43</sup> verrà sviluppata, secondo quanto stabilito dalla RO2<sup>44</sup>. Lo *scope* è rappresentato in tabella attraverso i box rossi tratteggiati, e circonda la "cella" *Make-Work Unit*.

Il criterio di esplorazione dei possibili casi di studio e scelta dello *scope* consiste nella "maggior esigenza" di un tool a supporto del decision making nell'EM in ognuna delle celle rappresentative del PMS. Le informazioni apportate dalla gap analysis si inseriscono in questo contesto, motivando la scelta di sviluppo di nuovi KPI nello *scope* costituito dalla cella *Make-Work Unit*.

Le ragioni di scelta sono illustrate nell'elenco sottostante, nel quale è riportato il gap utilizzato a supporto della scelta del focus in questione, nella maniera in cui esso è stato numerato nella gap analysis a pag. 87:

- GAP 1 - *scale* dei KPI di EE più ristretto rispetto al tradizionale livello nazionale e settoriale di studio dei KPI di EE.
- GAP 1 - supportare l'EM a livello di fabbrica sviluppando KPI di EE a livello stabilimento, macchina, processo.
- GAP 2- KPI di EE orientati al benchmarking: comparare l'EE di stabilimenti e processi distinti (simili per caratteristiche produttive).
- GAP 3- KPI di EE orientati all'identificazione delle inefficienze a livello stabilimento, in ottica di miglioramento continuo:feedback sull'efficienza di utilizzo dell'energia.

<sup>43</sup> RQ2: "In che modo supportare il decision making nell'Energy Management delle aziende manifatturiere attraverso misure delle performance di consumo energetico orientata al continuous improvement?"

<sup>44</sup> RO2: Utilizzare il framework proposto per circoscrivere l'area maggiormente critica in termini di esigenza di un tool a supporto del decision making nell'Energy Management, a cui la RQ2 verrà riferita.

Si può dunque formulare in maniera esplicita il focus e lo *scope* di applicazione della RQ2, e delle relative RO, che verrà trattata nel successivo capitolo 5:

- per quanto concerne lo *scale* dello sviluppo delle misure di performance di EE, esso è posto al livello macchina utensile.  
Lo scale Work Unit dell'ISA-95 è riferito alla singola stazione operativa, e dal momento che l'industry di riferimento della trattazione è l'industry della produzione discreta (e in particolare dell'automotive), la stazione operativa corrisponde in questo caso di studio proprio alla macchina utensile. Si auspica in quasi tutti i gap un focus su stabilimento, macchina e processo: dal momento che gli Energy KPI sono sviluppati secondo un approccio innovativo, si partirà dal sistema "più semplice", che è quello della singola macchina, in modo tale da aprire future possibilità di studio anche a scale *maggiori* per i quali si dovranno considerare ulteriori elementi di difficoltà per effetti di sovrapposizione di diverse cause di sistema. Ciononostante, in un'ottica di "anticipazione" di quanto sarà sviluppato nel capitolo 5, in virtù della natura degli indicatori progettati, si ritiene che la metodologia di sviluppo degli Energy KPI possa essere applicata non solo a macchine utensili ma ad impianti più strutturati (il livello selezionato è dunque estendibile fino allo scale "Work Center").
- per quanto concerne lo *scope* dei processi del sistema manifatturiero, si considerano i confini del singolo stabilimento. Le relazioni dello stabilimento produttivo con il resto della SC (ad esempio clienti coinvolti nel processo di Return e fornitori coinvolti nel processo di Source) sono considerate *out of scope*. In riferimento ai KPI tester e in generale alle metriche inserite nelle diverse celle, nella riga *Make* selezionata si nota un'interessante possibilità di sviluppo di misure in grado di analizzare il *perché* dello spreco, in modo da poterlo ridurre e gestire al meglio (si veda anche Tabella 4.3).

Si svilupperanno nuove misure di performance orientate a gestire e ridurre lo spreco ovviamente energetico all'interno dei processi produttivi di una macchina utensile considerando come sistema di riferimento produttivo il sito all'interno del quale la macchina opera. E' un orientamento tipico del filone accademico della *Lean Manufacturing* applicata all'EE.

A riprova valore di supporto fornito dal PMS nell'esplorazione di differenti casistiche di studio, vengono indicati esempi di possibili sviluppi futuri di KPI per altre celle del PMS. A partire dal PMS proposto, si potrebbe valutare, attraverso lo sviluppo di nuovi indicatori (assieme naturalmente ad molteplici strumenti a supporto):

- l'impatto della gestione delle scorte nel processo *Plan* sui consumi energetici della macchina o del sito produttivo (rispettivamente *Work Unit* e *Site*);
- l'impatto della flessibilità di consegna nel processo *Delivery* (esempio: programmazione dei percorsi di consegna) sulle misure di energy-performance riferite ad un livello *Site*.
- l'impatto della qualità dei processi di selezione dei fornitori (*Source*) sulle performance di EE economiche dello stabilimento, all'interno del quale è presente il costo dell'energia, progettando ad ese

## Capitolo 5 : METODOLOGIA *CROSS-VIEW* per lo SVILUPPO di ENERGY KPI per la MACCHINA UTENSILE

La RQ2 definita nel capitolo 3 chiedeva: RQ2: *"In che modo supportare il decision making nell'Energy Management delle aziende manifatturiere attraverso misure delle performance di consumo energetico orientate al continuous improvement?"*

In relazione alla RQ2, è stata definita la RO4: "Sviluppare una nuova metodologia che abiliti l'analisi e miglioramento delle performance di consumo energetico in qualità di decision support tool per gli energy manager, basata sulla progettazione e l'utilizzo di appropriati Key Performance Indicator". Il seguente capitolo si propone di soddisfare l'obiettivo di questa RO attraverso le sub-RO:

- RO5: "Progettare -attraverso un approccio omnicomprensivo che integri visione energetica e visione manifatturiera dello stabilimento- Energy KPI che evidenzino in maniera puntuale il grado di efficienza delle operations e del management dello stabilimento nei confronti del consumo energetico della risorsa in esame";
- RO6: "Introdurre delle guideline per un utilizzo efficace degli Energy KPI in azienda, con l'obiettivo di consentirne una gestione appropriata da parte del management e abilitare il miglioramento delle performance energy-related tramite le informazioni da essi apportate".

La

Figura 5.1 rappresenta graficamente l'outline della metodologia, dalla considerazione della risorsa produttiva in analisi all'utilizzo e gestione del sistema di KPI generati. L'outline è costituito da due macro-blocchi: la progettazione della metodologia (a cui la RO5 si riferisce) e l'implementazione della metodologia (a cui la RO6 si riferisce). Ciascun box in figura (che rappresenta uno step della metodologia) viene successivamente spiegato e dettagliato nelle diverse sezioni. Verranno a tal proposito effettuati diversi richiami a fonti della letteratura per poter supportare e/o giustificare alcuni aspetti di applicazione della metodologia. Una caratteristica portante di questo capitolo -riguardante il processo di descrizione della metodologia sviluppata-

è quella di essere sufficientemente ad ampio spettro ed esaustiva tale da poter guidare efficacemente le successive applicazioni future (complete o ridotte) della metodologia ad altre industry del Manufacturing o altri sistemi produttivi diversi dai casi d'uso trattati.

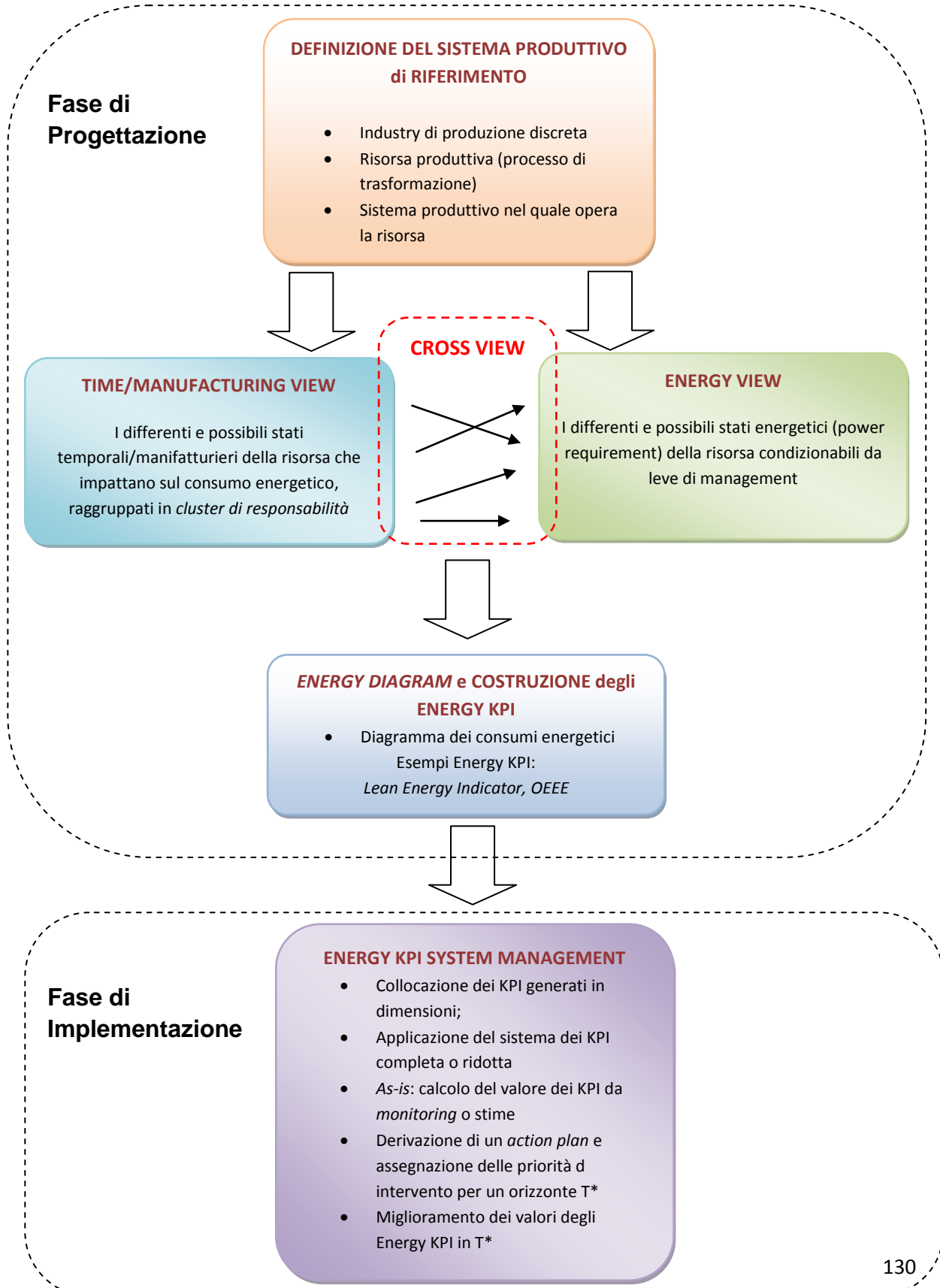


Figura 5.1: Outline della metodologia Cross View.

### 5.1: Step 1 -Definizione del sistema produttivo di riferimento

In primis è necessario stabilire a *quale* sistema di riferimento produttivo venga applicata la metodologia cross view per lo sviluppo di Energy KPI. Specificare il sistema di riferimento produttivo significa specificare:

1. a quale industry del discrete Manufacturing ci si riferisce –elettrico, meccanico, automotive, robotica, ecc;
2. per quale processo di trasformazione, ovvero per quale risorsa produttiva all'interno dello stabilimento, si vogliono sviluppare gli Energy KPI - fresatura, alesatura, stampaggio, verniciatura, ecc;
3. il sistema produttivo nel quale la risposta produttiva precedentemente definita opera –altre stazioni operative e loro layout, manualità o automatizzazione delle operazioni, assieme ad altri aspetti gestionali quali la modalità di risposta alla domanda (esempio:make to stock), ed altre molteplici caratteristiche, appartenenti a categorie distinte tra di loro, che contribuiscono ad una definizione completa del sistema produttivo.

La verifica della bontà di applicazione della metodologia cross view al sistema di riferimento “candidato” è supportata attraverso dimensioni di classificazione orientate a valutare qualitativamente il beneficio dell'impiego della metodologia (Figura 5.2 a pagina seguente) al caso d'uso in esame. Inoltre, è stato formulato un template (Tabella 5.1 a pag.138) a supporto della definizione del sistema produttivo di riferimento, strutturato aggregando le diverse tipologie possibili di sistemi di produzione industriale verso il quale si decide di rivolgere la metodologia.

Di fronte ad un panorama così ampio di possibilità di applicazione della metodologia all'interno della produzione discreta, ci si potrebbe domandare verso quali tipi di processi/situazioni manifatturiere abbia maggiormente senso applicare la metodologia proposta. In particolare, anche grazie alle informazioni ottenute dall'intervista (riportata in Allegato C a pag.243), sono state individuate tre dimensioni esplicative che aiutano a giustificare l'adozione della metodologia cross view all'interno di uno stabilimento produttivo. Esse, per costruzione, valutano l'appropriatezza sia dell'industry di riferimento, che del processo produttivo, che del sistema produttivo e sono:

- Il livello di automazione dello stabilimento;
- Il consumo energetico del processo di trasformazione, valutabile ad esempio attraverso l'indicatore SEC;
- l'impatto ambientale del processo, valutabile ad esempio attraverso l'indicatore di Carbon Footprint.

Si può notare come nella prima dimensione di classificazione si consideri lo “stabilimento” anziché il “processo” come le ultime due, dal momento che il livello di automazione può essere ragionevolmente attribuibile ad uno stabilimento produttivo nel suo complesso (basti pensare al grado di informatizzazione, ai sistemi di controllo utilizzati nella fabbrica ecc.), mentre le dimensioni di consumo energetico e impatto ambientale sono più specifiche del singolo processo di trasformazione.

La Figura 5.2 illustra lo spazio di applicazione della metodologia attraverso le tre dimensioni. In verde viene riportato il “volume ottimo di applicazione”: fabbriche maggiormente automatizzate, con processi produttivi intensivi dal punto di vista energetico e caratterizzati da un impatto ambientale più forte (o per la natura e l'entità delle emissioni, oppure per la location e la comunità in cui la fabbrica opera), trovano maggiormente giustificazione ad un'applicazione della metodologia.

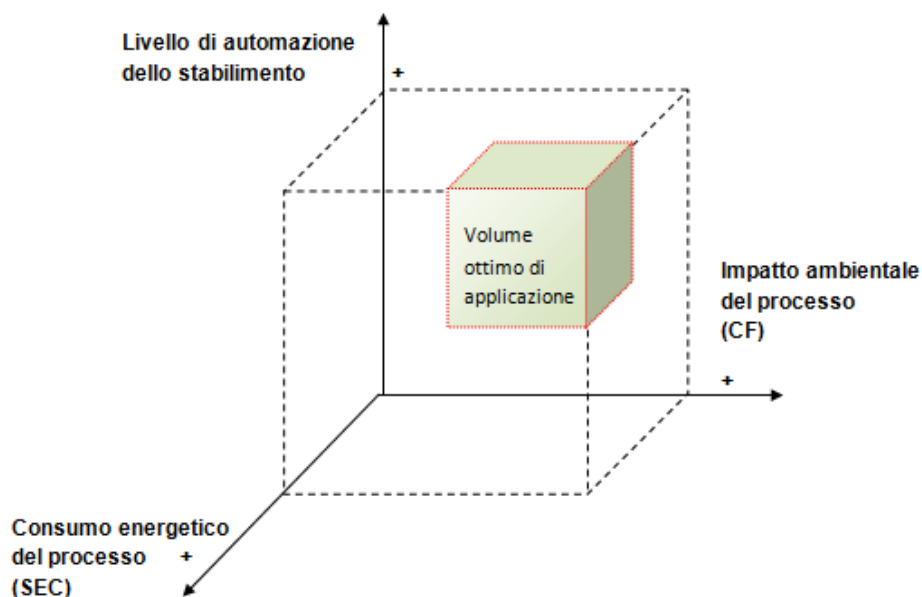


Figura 5.2: Driver di valutazione dell'applicabilità della metodologia ad un sistema produttivo.

Ci si potrebbe domandare per quale motivo queste tre dimensioni siano state scelte in qualità di driver di giustificazione all'applicazione della metodologia.



La dimensione del livello di automazione dello stabilimento costituisce un driver che abilita l'applicazione della metodologia cross-view, in quanto si suppone che applicare una metodologia che richieda l'impiego di sistemi di monitoraggio di consumo energetico –continuo o discreto- sia più facile, oltre che più probabile, per un sistemi produttivi già parzialmente o totalmente automatizzati, rispetto ad una situazione in cui il livello di automazione e informatizzazione sia molto basso. Si suppone insomma che un sistema -nella sua situazione as-is, provvisto di sistemi di controllo e di raccolta dei dati dallo shop floor, possa facilmente giustificare un investimento in un'adozione di un sistema di controllo per la visualizzazione e l'analisi dei consumi energetici, oppure in un upgrade più economico e semplice del sistema di controllo correntemente utilizzato. Ciononostante, il livello di automazione non costituisce un driver fortemente vincolante, in quanto la metodologia, essendo estremamente flessibile, può essere applicata secondo una scala di utilizzo ridotta, ad esempio utilizzando dati di granularità maggiore ricavati da stime ragionevoli, o dati provenienti da macchine e impianti simili di altri stabilimenti, ecc. In un utilizzo ridotto, questi dati potranno poi essere inseriti manualmente all'interno di fogli elettronici per ricavare il calcolo degli Energy KPI.

Un driver molto vincolante è sicuramente il consumo energetico del processo produttivo realizzato dalla risorsa in analisi. La dimensione del consumo energetico considera come maggiormente idonee all'applicazione della metodologia quelle lavorazioni maggiormente *energy consuming*, mentre, a parità di SEC, si preferiscono quelle lavorazioni a più alto impatto ambientale, sia in termini assoluti (ad esempio sulla base del valore dell'impronta di carbonio) e sia in termini relativi (ad esempio, a seconda della localizzazione dello stabilimento, le normative riguardanti le emissioni e l'impatto ambientale possono prevedere condizioni più o meno stringenti).

Evitando di soffermarsi sulla descrizione delle varie industry del discrete Manufacturing (punto "1" del sistema di riferimento produttivo), si introduce la tipologia di processi di trasformazione esistenti in questa industry, (punto "2") al fine di visualizzare la panoramica di processi ai quali la metodologia può essere applicata (Figura 5.3).

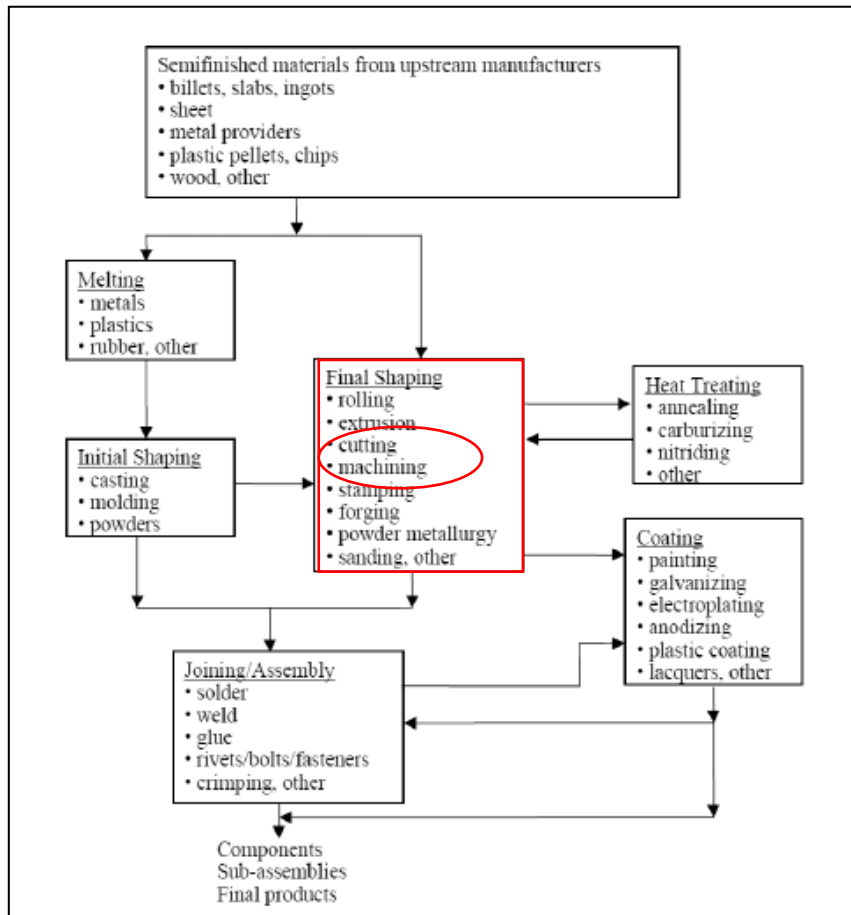


Figura 5.3: Common processes in discrete manufacturing". Fonte: Lamontagne, Kusik, Benson, & Wright, 2000.

I diversi box rappresentano ciascuna fase principale del ciclo tecnologico, nei quali vi sono le possibili lavorazioni (ad esempio: *weld*, *glue*) appartenenti a ciascuna fase principale (in riferimento all'esempio, *Joining/Assembly*) del ciclo tecnologico, le cui successioni nel tempo sono rappresentate attraverso le frecce che uniscono i box. I molteplici possibili collegamenti tra le fasi mettono bene in luce l'esistenza di cicli tecnologici non obbligati tipici della produzione discreta.

Mentre a questo punto della trattazione –in sede di illustrazione della metodologia sviluppata- non si circoscrive quale sia l'industry di riferimento e il sistema produttivo in cui la risorsa opera (giacché sono elementi che entrano in gioco in sede di applicazione della metodologia), si ritiene invece opportuna la scelta di restringere il campo della risorsa produttiva da analizzare. Questa trattazione sceglie di focalizzarsi sulle operazioni di *Final Shaping*, in particolare quelle riguardanti il *cutting* e il *machining*, essendo questo tipo di lavorazioni ampiamente trattate in letteratura. Si tratta dunque del caso di una macchina utensile CNC o un centro di lavoro dotato di un certo grado di automatizzazione. Le informazioni ottenibili dalla letteratura consentiranno di stilare gli stati energetici della macchina (step 2) in maniera più accurata, e conseguentemente faciliteranno il processo di validazione degli stati stessi.

Una volta definita l'industria e la risorsa produttiva di riferimento, è necessario definire la tipologia e le caratteristiche del sistema produttivo nel quale essa opera (punto "3"). Tale specificazione consente di definire le relazioni che sussistono tra la risorsa produttiva e gli altri elementi del sistema produttivo; dal momento che la natura di tali relazioni ha chiaramente un impatto sulle performance energetiche della risorsa produttiva (la macchina utensile, come prima definito). A tal proposito ci si riferisce in prima analisi alla classificazione a tre assi dei sistemi di produzione industriale di Brandolese & Garetti (1981). Di conseguenza, si può immaginare ciascun sistema di produzione industriale idealmente come un punto<sup>45</sup> dello spazio formato da tre dimensioni ben definite, ciascuna articolata secondo tre attributi (**Error! Reference source not found.**).

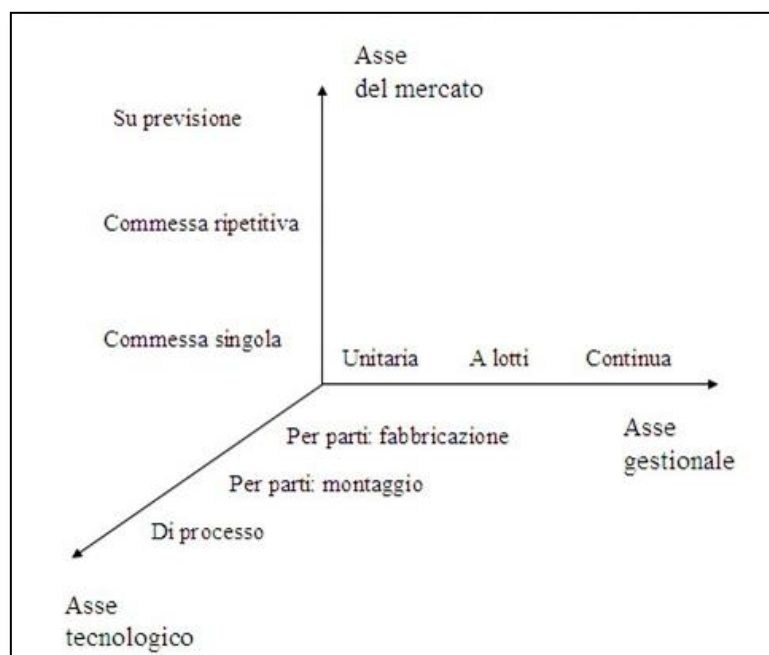


Figura 5.4: Classificazione a tre assi dei sistemi di produzione industriale. Fonte: Brandolese & Garetti, 1981.

### Asse Tecnologico

La prima dimensione –l'asse gestionale- rappresenta le modalità di realizzazione del prodotto. La produzione può essere:

- di processo –dove gli elementi che costituiscono il prodotto finale non possono essere facilmente identificati, e il ciclo tecnologico è "obbligato", ovvero ben definito e vincolante;

<sup>45</sup> Non tutti i punti dello spazio definito dall'asse del mercato, tecnologico e gestionale sono effettivamente o anche potenzialmente esistenti: esistono infatti delle aree o dei volumi di "incoerenza" all'interno del cubo, ad esempio una produzione di processo unitaria, oppure a produzione su commessa singola continua.

- per parti / manifatturiere / discrete –dove il processo produttivo è costituito da un certo numero di componenti discreti, o parti, di diversa natura. Il processo produttivo di massima comprende sia la fabbricazione che il montaggio, ed è caratterizzato da una grande varietà di cicli tecnologici delle parti componenti; per questo motivo questi processi possono essere anche definiti come produzioni “a ciclo tecnologico non obbligato”.

Come già specificato nel capitolo 1 (paragrafo 1.1.4: *Industry di riferimento*) – previa motivazione- l’industria di processo è in questa trattazione *out of scope*: la letteratura, gap analysis e conseguentemente la metodologia è riferita alla sola produzione discreta.

### Asse Gestionale

La seconda dimensione –l’asse gestionale- rappresenta le modalità di realizzazione del volume produttivo. In questo senso la produzione può essere:

- unitaria (U) –la variabilità dei cicli di produzione è molto spinta, e il sistema deve rendere possibile, tramite caratteristiche di flessibilità, l’ottenimento delle quantità richieste dai singoli ordini;
- a lotti (B): i diversi cicli tecnologici hanno luogo con criteri di alternanza. I prodotti sono realizzati in lotti di entità superiore ai fabbisogni immediati, in modo tale che le scorte create possano essere utilizzati i centri operativi saranno impegnati in altre attività;
- continua (C) – i cicli tecnologici costanti anche per periodi di tempo lunghi. Si realizzano in pratica prodotti con caratteristiche omogenee.

La specificazione dell’asse gestionale (produzione unitaria, o a lotti, o continua) dipende sostanzialmente dalla tipologia e dalla durata dei set-up che caratterizzano il cambio prodotto, oltre che chiaramente al mercato a cui ci si rivolge e alla gamma che esso richiede (si veda “Asse del mercato” alla pagina seguente). Per quanto concerne le performance energetiche , il set-up merita particolare attenzione, in quanto, in funzione della sua tipologia e della sua durata, può condizionare il consumo energetico dei diversi cicli di produzione. Per questo motivo, all’interno della fase di specificazione del sistema produttivo, occorre tener conto anche della tipologia di set-up, che può essere:

- *sequence-dependent* –che dipende dalla funzione dell’operazione precedente e da quella dell’operazione successiva;
- *operation-dependent* -che dipende solo dalla funzione associata all’operazione che si va ad eseguire.

Ad esempio, nel caso di produzioni *sequence-dependent*, risulterà opportuno bilanciare l'obiettivo di sequenziamento dei pezzi per la riduzione del tempo (e conseguentemente dell'energia) speso per i set-up assieme ad altri obiettivi di produzione potenzialmente in trade-off (ad esempio il livello di WIP).

### Asse del Mercato

Per quanto concerne il terzo e ultimo asse, l'asse del mercato, per l'ambito di ricerca di questa trattazione esso assume un rilevanza minore rispetto alle due dimensioni spiegate precedentemente. Tuttavia, ai fini di un'attenta analisi delle performance energetiche, può risultare utile una sua considerazione per una comprensione di driver come la variabilità del mix produttivo, intesa sia come variabilità tempi ed energia di processamento, e come variabilità del tempo e dell'energia dedicati per i set-up (pur essendo maggiormente deducibile dall'asse gestionale). Inoltre si può aggiungere come maggiore sia la competizione sul prezzo, (un esempio nel caso delle produzioni su previsione di una certa commodity) maggiore sarà l'*effort* ad ottenere energy saving al fine di veder ridotta la spesa energetica per il prodotto.

Sull'asse del mercato, le produzioni si distinguono in:

- produzioni su commesse singole (S) –nelle quali l'azienda riceve ordini molto differenziati tra di loro, per i quali spesso occorre elaborarne parzialmente o totalmente il progetto e il ciclo di lavorazione;
- produzioni su commesse ripetitive (R)–è il caso di aziende subfornitrici che realizzano prodotti dalle caratteristiche definite per gruppo di clienti o aziende che producono su “catalogo”, dopo il manifestarsi dell'ordine, una gamma di prodotti del quale si conosce il ciclo di lavorazione;
- produzioni su previsione (per il magazzino, MTS) –dove l'impresa realizza volumi abbastanza elevati di prodotti prima del manifestarsi degli ordini, che fluiscono ad un gran numero di clienti anonimi attraverso una rete di distribuzione.

La sola definizione del sistema produttivo in cui la risorsa opera tramite la classificazione a tre assi risulta tuttavia non sufficiente qualora se ne vogliano analizzare e gestire le performance energetiche: in questo caso infatti gioca un ruolo significativo anche l'architettura del sistema produttivo e il livello di automazione dello stesso. Inoltre, poiché la produzione di processo è *out of scope*, la descrizione delle possibilità progettuali esistenti nell'architettura della produzione industriale e nel livello di automazione verranno riferite alla sola produzione discreta.

## Architettura della Produzione Discreta

Per architettura della produzione si intende il modo in cui le stazioni operative sono disposte all'interno dei sistemi di produzione. Il layout è un fattore importante da tenere in considerazione per quanto riguarda le performance energy-related, dal momento che esso condiziona le relazioni di tipo energetico che sussistono tra risorsa produttiva selezionata e il resto della fabbrica: un semplice esempio può essere un semilavorato che passa da una stazione operativa alla successiva attraverso un sistema di movimentazione automatico, anziché essere trasportato manualmente al reparto successivo.

Coerentemente con l'industry di riferimento di questa trattazione, si illustrerà la sola tassonomia delle architetture della produzione discreta, distinguendo tra fasi di fabbricazione e fasi di montaggio.

L'architettura nelle produzioni per parti nella fase di fabbricazione è così definita:

- per reparti (job shop, JS) – nei quali le stazioni operative sono raggruppate in gruppi omogenei per tipo di lavorazione effettuabile;
- cellule (C) – nelle quali le macchine diverse sono raggruppate in cellule capaci di lavorare un'intera famiglia di prodotti, qualora sia possibile individuare secondo la Group Technology pezzi con cicli omogenei;
- transfer line (L) – nelle quali le stazioni sono disposte secondo la successione prevista dal ciclo tecnologico per la fabbricazione di un prodotti in grandi quantità e con varianti limitate;

L'architettura nelle produzioni per parti nella fase di montaggio è così definita:

- Montaggio a posto fisso (F) –dove l'assieme da realizzare rimane fermo nella stazione operativa fino al completamento del ciclo;
- Montaggio a cellule (C) –dove un insieme limitati di stazioni svolge una porzione importante del ciclo di montaggio di una famiglia di prodotti;
- Montaggio in linea (L) (a trasferimento) –dove il ciclo di montaggio del pezzo si svolge su una successione di stazioni operative, e l'assieme da realizzare si muove da una stazione all'altra grazie ad un sistema di movimentazione manuale o automatico..

## Automazione delle Produzione Discreta

Oltre che a costituire un driver utile a giustificare l'impiego della metodologia, il livello di automazione e le soluzioni per ciascun livello di automazione è senza dubbio un elemento da considerare per la comprensione delle relazioni tra risorsa selezionata e sistema produttivo, giacché il livello di automazione può essere considerato un buon indicatore del grado di spesa energetica del sistema,

ragionevolmente più alto di un sistema costituito da operazione svolte in prevalenza manualmente.

Il panorama delle soluzioni possibili per l'automazione delle produzioni manifatturiere è ampio, e sostanzialmente fa riferimento alle due gradi tipologie di automazione rigida e automazione flessibile, che consente di variare il modo di lavorare i prodotti. Esempi di soluzioni automatizzate per la fabbricazione sono (Garetti & Taisch, 1995):

- A.T.L. – Automatic Transfer Line;
- N.C. – Numerical Control, ovvero macchine a controllo numerico stand alone;
- F.M.S. – Flexible Manufacturing System, celle automatiche costituite da stazioni a controllo numerico e sistema di trasporto programmabile;
- F.M.C. - celle automatiche con ampia varietà di famiglie di pezzi da produrre e a bassi volumi unitari;
- F.M.L. - celle automatiche con un limitato numero di famiglie di pezzi da produrre, configurate come una linea.

Esempi di soluzioni automatizzate per il montaggio sono (Garetti & Taisch, 1995):

- R.A. – Robotic Assembly;
- F.A.S. – Flexible Assembly System;
- A.A.L. – Automatic Assembly Line.

Le cinque dimensioni appena esaminate, che permettono di classificare con esaustività il sistema produttivo all'interno del quale una risorsa produttiva opera sono state rielaborate sotto forma di "template" e riassunte in Tabella 5.1.

Tabella 5.1: Template per la definizione del sistema produttivo.

Discrete Manufacturing System (DMS)	Market Dimension			Management Dimension			Layout		
	S	R	MTS	U	B	C	JS	C	L
<b>MANUFACTURE</b>									
							→ Automation degree FMC    FML ....hybrid solution...		
<b>ASSEMBLY</b>							F	C	L
							→ Automation degree Automatic Assembly Line, FAS, ...hybrid solutions...		

In un caso di studio, il template generato inquadra con precisione un sistema produttivo di riferimento attraverso l'inserimento di una "X" nelle celle appropriate. Oltretutto, il template, per la sua versatilità, può essere utilizzato /rielaborato /migliorato per qualsiasi altra situazione in cui un preciso inquadramento dei sistemi di produzione industriale pone le basi per un caso di studio, il cui *purpose* può essere anche notevolmente differente da quello relativo a questo lavoro. Volendosi ricollegare alla definizione dei driver di consumo energetico.

## 5.2: Step 2- Energy View: definizione dei *power requirement* (stati energetici)

Il termine *energy view* fa riferimento ad una considerazione/visione di tipo energetico della risorsa selezionata nello step 1. Come già stabilito nel Research Framework (capitolo 3, pag. 93), l'energia finale *in scope* della metodologia cross-view è l'energia elettrica. Si ricorda la definizione di *energy view* e la terminologia ad essa connessa:

Essendo un approccio fondato sull'EM, l'*energy view* della risorsa è ottenuta domandandosi quali siano i suoi *power requirement* elettrici [W] la cui *durata* (e quindi il consumo energetico ad essi associato) possa essere potenzialmente influenzata da decisioni prese a livello di management della risorsa e/o del sistema produttivo. Questi *power requirement* rappresentano nella metodologia gli *energy state*: stati energetici.

In questa fase è dunque necessario individuare i tutti possibili stati energetici<sup>46</sup> in cui la risorsa selezionata può trovarsi durante il suo funzionamento, e che sono "condizionabili" da leve gestionali.

Per la definizione dei differenti *power requirement* della risorsa ci si può riferire alle informazioni provenienti da associazioni di esperti, a degli standard appositi, oppure ad informazioni acquisite da costruttori e/o utilizzatori della risorsa in questione. Poiché non esiste tuttora uno standard che definisca gli stati energetici delle macchine utensili, essi sono stati ricavati da differenti fonti quali l'Associazione Costruttori Italiani di Macchine Utensili, Robot e Automazione (UCIMU), la letteratura (Cannata, 2011; Yildirim, 2007; Prabhu & Taisch, Calvanese, 2012), e le considerazioni aggiuntive aggiunte attraverso interviste ad esperti del comportamento energetico delle macchine utensili.

---

<sup>46</sup> Anche se indicati in letteratura come "stati energetici", in realtà essi fanno riferimento ai *power requirement* [W] e non all'energia vera e propria [J].



Gli stati energetici sono così ottenuti sono illustrati in Tabella 5.2, che riporta inoltre un'informazione sull'andamento qualitativo nel tempo di ciascuno stato energetico .

Tabella 5.2: I diversi power requirement della macchina utensile considerati nella trattazione e relativa descrizione.

Stato Energetico	Descrizione	Costante nel tempo	Variabile nel tempo, possibilità di picchi significativi
Off	La macchina è spenta e non assorbe alcun tipo di potenza	X	
Ramp Down	Spegnimento della macchina. Ha un andamento decrescente nel tempo, che culmina nello stato di <i>Off</i> (potenza nulla). Il valore massimo di potenza iniziale di Ramp Down e la rapidità con cui la potenza diminuisce sino allo stato di <i>Off</i> dipende dalla specifica macchina.		X
Idle	E' il <i>baseload</i> della macchina: tutti i componenti ausiliari sono attivi e la macchina è pronta per lavorare, ma è in attesa del pezzo da lavorare a causa di problemi gestionali o manutentivi all'interno del sistema produttivo.	X	
Maintenance	Energia spesa dalla macchina utensile durante la procedura di manutenzione, a causa di specifiche azioni che richiedono un consumo energetico. Questo <i>power requirement</i> è energeticamente equivalente allo stato di stand-by: ciononostante, è preferibile distinguere uno stato di stand-by che occorre per motivi gestionali da uno stato di stand-by che occorre per motivi legati alla manutenzione.	X	
Stand-By	E' un consumo energetico ridotto rispetto allo stato di <i>Idle</i> . In aziende più all'avanguardia in termini di energy saving le macchine utensili possono essere convertite da uno stato di idle ad uno stato di stand-by se l'idling della macchina perdura oltre ad una soglia $t^*$ .	X	
Set-up	Energia spesa durante il set-up. E' l'energia spesa per il cambio utensile del mandrino.		X
Ramp-up (o Warm-up)	Accensione della macchina, che avviene secondo un profilo di potenza che aumenta nel tempo fino ad un picco $P_{max}$ , per poi decrescere e assestarsi su un valore costante $P_{low}$ <sup>47</sup> . L'intensità di $P_{max}$ , e la rapidità con cui si arriva al picco dipende dal tipo di macchina.		X

<sup>47</sup> Si veda l'allegato 6 in Appendice B che riporta qualitativamente la potenza nel tempo dello stato di ramp up.

Processing (o Working)	Energia spesa dalla macchina utensile durante il processamento dei pezzi. E' la potenza più elevata che può essere richiesta dalla macchina. Questo stato considera nel complesso sia le lavorazioni attive sul pezzo (ovvero il machining, la rimozione del materiale) , sia i movimenti in rapido necessari nelle lavorazioni che l'energia spesa da parte dei componenti ausiliari durante le lavorazioni (es:air cutting):		X
---------------------------	--	--	---

Inoltre, risulta non indispensabile, ma senz'altro utile, una rappresentazione sia degli stati energetici che delle possibili transizioni tra gli stati attraverso un diagramma di stato o grafo di stato, come evidenziato nel Research Framework a pag. 93. La Figura 5.5 fornisce un esempio generico di modellazione a stati discreti ed energetici della risorsa produttiva. E' importante precisare come l'esempio si proponga di fornire una base di un possibile comportamento energetico della macchina utensile in un ampio set di situazioni. In casi applicativi è specifici è possibile constatare un'eventuale assenza di stati energetici (come lo stato di Stand-By) o l'assenza o presenza di ulteriori transizioni.

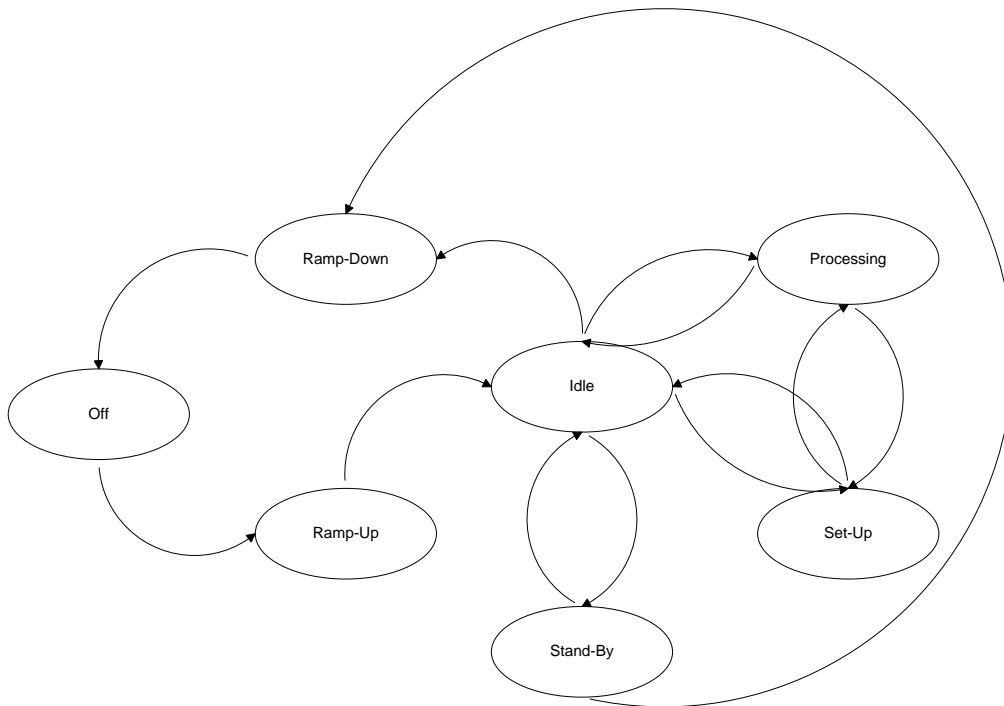


Figura 5.5: Esempio generico di diagramma a stati energetici di una macchina utensile.

Si riportano nell'elenco sottostante le assunzioni effettuate per la costruzione del diagramma a stati, alcune volte alla semplificazione del diagramma:

1. Lo stato energetico di *Maintenance* (relativo alle operazioni di riparazione a seguito di guasti) viene considerato negli Energy KPI ma non graficato nel diagramma a stati, per un motivo di semplificazione del grafo. Si suppone infatti che un guasto possa accadere in qualsiasi momento

(stato) di funzionamento della macchina, e di conseguenza che il sistema possa sempre transitare in/da questo stato;

2. Analogamente a quanto stabilito per lo stato di Maintenance nel punto precedente, si suppone per ogni nodo una possibile transizione conseguentemente non graficata- da/in stato di Off: nel caso in cui si tratti di un'avaria completa che comporti l'arresto e lo spegnimento totale della macchina (Off) o di arresti dovuti a problematiche esterne (ad esempio un blackout);
3. Si suppone che lo spegnimento della macchina avvenga sempre e solo secondo una transizione Idle-Ramp Down- Off;
4. Si suppone il "ripristino" del sistema al funzionamento normale dopo lo stand-by attraverso un passaggio verso lo stato di idle. I componenti della macchina sono attivi e pronti per lavorare nuovamente.

Attraverso la metodologia proposta, le variabili che comportano la durata di ciascuno stato energetico sono individuate, clusterizzate secondo un criterio ragionevole, e attribuite agli energy state tramite la cross view.

### 5.3: Step 3 -Time/Manufacturing View: definizione delle *variabili di consumo energetico (stati manifatturieri)*

Si ricorda la definizione di time view e la terminologia ad essa connessa, illustrata precedentemente nel Research Framework in capitolo 3:

Il *time/manufacturing view* della risorsa comporta la determinazione di tutti gli *stati temporali/manifatturieri* in cui essa può trovarsi durante il suo funzionamento, normale o degradato. Gli stati manifatturieri definiscono in maniera univoca una *condizione di inefficienza* (intesa come perdita, o spreco) che impatta sui diversi consumi energetici della risorsa stessa. (stati energetici definiti nello step 2). Per questo motivo gli stati manifatturieri sono definiti, per questa trattazione, *variabili di consumo energetico*.

Le *variabili di consumo energetico* sono particolari stati del sistema esprimibili come intervalli di tempo, misurati in [t]. Nella trattazione variabile di consumo energetico è un sinonimo di *stato manifatturiero*, per enfatizzarne l'impatto sui consumi energetici.

Le *variabili di II livello* associate a ciascuno stato energetico sono “manopole” sulle quali si può agire attraverso un appropriato *management* del sistema produttivo al fine di ridurre l’intervallo temporale dello stato manifatturiero associato, e quindi il relativo consumo energetico, dal momento che tali intervalli saranno associati a determinati power requirement [W] attraverso la cross view. Le variabili di II livello possono essere sia qualitative e quantitative.

I *cluster di responsabilità aziendale* sono creati nella metodologia con l’obiettivo di indirizzare in maniera univoca i consumi energetici rilevati ad un set ben definito di attori all’interno dell’organizzazione, che saranno conseguentemente coinvolti nei piani di azione per il miglioramento delle performance energy-related. Questo approccio risulta dunque estremamente funzionale in termini di supporto all’EM che la metodologia si propone di garantire.

Analogamente a quanto fatto nello step 2, è possibile “guardare” la risorsa dal punto di vista temporale/manifatturiero, e derivarne conseguentemente gli stati discreti manifatturieri. Per la definizione degli stati manifatturieri di una macchina utensile operante nella produzione discreta sono state consultate informazioni provenienti da Cannata (2011), dall’Associazione Italiana Produttori di Macchine Utensili (UCIMU), e infine un consulto tramite esperti che ha permesso di raffinare gli stati inizialmente considerati. elencare nel modo seguente:

- Idle: la macchina è ferma per motivi gestionali, in attesa di effettuare le lavorazioni, e pronta per lavorare. In particolare, sono state individuate tre tipologie di idle:
  - Idle per *starving* o *starvation*: la macchina è vuota, in attesa di processare del pezzo da processare;
  - Idle per *blocking*: la macchina non può rilasciare a valle il pezzo processato a causa del riempimento totale del buffer a valle;
  - Idle per mancanza utensile nel magazzino a bordo macchina;
- Down 1..N: è uno stato che fa riferimento a diversi tipi di failure della macchina che impattano sulla produzione: esempi possono essere un’interruzione totale della produzione per un guasto totale o un suo rallentamento per un guasto parziale;
- Set up: la macchina esegue il set up cambiando utensile ;
- Maintenance: è lo stato per il quale la macchina viene riparata, o per il quale vengono eseguite piccole attività di manutenzione;
- Working: la macchina processa attivamente i pezzi.

Tuttavia tali stati non possono essere considerati di per sé *stati manifatturieri* nello stesso modo in cui essi sono stati definiti precedentemente (ovvero come *variabili di consumo energetico*) dal momento che essi non spiegano in maniera

definita e univoca il consumo energetico della macchina attraverso specifiche *condizioni di inefficienza* nella gestione della macchina stessa o del sistema produttivo, così come nella conduzione delle diverse operations di produzione.

Un esempio che permette di chiarire questa affermazione è lo stato di *Working*. A questo livello di dettaglio dello stato non è possibile discernere tra una lavorazione dei pezzi di buona qualità da una lavorazione di pezzi difettosi, per i quali l'energia utilizzata risulta dunque energia di spreco, che l'Energy KPI è chiamato ad individuare. Occorre dunque effettuare un ulteriore passo avanti.

Per una definizione esaustiva delle variabili di consumo energetico, oltre alle informazioni provenienti dalla letteratura, risulta fondamentale una buona conoscenza e comprensione del funzionamento della risorsa all'interno del suo sistema di riferimento: questa conoscenza permetterà nella cross view di individuare quali siano i possibili stati di funzionamento della risorsa, in condizioni sia normali e sia degradate, che presentano un diverso impatto in termini di *power requirement*.

Dal momento che la letteratura offre di per sé valide overview di fattori e driver che condizionano il consumo energetico e in generale le performance ambientali, il diagramma di Ishikawa verrà usato in questa trattazione secondo una finalità di rappresentazione delle relazioni di causa effetto, anziché di supporto al processo di individuazione delle cause.

Per la definizione delle variabili puntuali di consumo energetico sulle quali ci si basa per lo sviluppo degli Energy KPI sono state utilizzate tre fonti di natura diversa in relazione al contributo apportato nella trattazione:

1. I fattori che influenzano in maniera diretta le performance energetiche ed ambientali stilati da Morvay & Gvozdenac (2008)<sup>48</sup>. Questo è un esempio di fonte bibliografica che in maniera diretta elenca quelle che sono variabili di consumo energetico di interesse per la trattazione, giacchè lo scopo dei due autori è la comprensione delle relazioni di causa effetto tra fattori di sistema e performance energetiche e ambientali tramite scatter diagram;
2. Il diagramma degli stati dell'impianto della scuola del Politecnico di Milano (Grando & Turco, 2005), utilizzato per ricavare gli indicatori di efficienza time-based quali utilizzo, disponibilità, saturazione e resa, le cui percentuali permettono di calcolare la produttività dell'impianto. Questa fonte contribuisce per via indiretta alla definizione delle variabili di consumo energetico, giacchè gli stati dell'impianto illustrati dal

---

<sup>48</sup> Si veda Allegato 8 in Appendice B.

diagramma<sup>49</sup> sono veri e propri stati manifatturieri (per come essi sono stati definiti nella trattazione);

3. La progettazione dell'Overall Equipment Effectiveness e le sue componenti (Nakajima, 1988 ). Anche questa fonte contribuisce per via indiretta alla definizione delle variabili di consumo energetico, e rappresenta una versione più “piccola” e più pratica di KPI di efficienza time-based rispetto ai KPI di utilizzo, saturazione, disponibilità e resa.

Per questo motivo si effettuano nella trattazione due time view differenti, che costituiscono dunque due applicazioni differenti della stessa metodologia cross view per la derivazione degli Energy KPI. Sono stati dunque sviluppati due casi:

- Caso 1: *productivity-based* - caso più completo ed esaustivo nell'obiettivo che la metodologia si propone, e “ispirato” al diagramma degli stati dell'impianto con il quale si calcola l'indicatore di produttività attraverso il contributo di utilizzo, saturazione, disponibilità, e resa;
- Caso 2: *OEE-based* – caso meno omnicomprensivo ma più semplice e attuabile, “ispirato” all'Overall Equipment Effectiveness, indicatore che calcola l'efficacia complessiva di un impianto attraverso il contributo di disponibilità, performance rate e qualità. E' importante precisare che gli stati energetici definiti in step 2 restano sempre validi e uguali qualsiasi sia la time view applicata (essendo una visione diversa della stessa risorsa produttiva). Una time view diversa comporta conseguentemente una cross view diversa tra stati energetici e stati manifatturieri e dunque comporta Energy KPI generati diversi.

### 5.3.1: Caso 1: Time View productivity-based

Per la definizione degli stati energetici della risorsa produttiva secondo la “time view productivity-based” sono state utilizzate le prime due fonti bibliografiche illustrate alla pagina precedente (Morvay & Gvozdenac, 2008; Grando & Turco, 2005). Le variabili di consumo energetico così ottenute sono state “aggregate” e aggiunte alle variabili autonomamente generate sulla base della conoscenza delle dinamiche di funzionamento delle macchine utensili negli stabilimenti produttivi, per costituire così un insieme stati manifatturieri della metodologia cross view applicata alla macchina utensile più omnicomprensivo possibile (rispetto al caso 2).

Le variabili di consumo energetico sono:

- Blocking & Starvation for Production Scheduling

---

<sup>49</sup> Si veda allegato 9 Appendice B.

- Waiting Tool (missing tool in tool buffer)
- Daily Starting
- Starting post Holidays
- Set-up
- Missing Orders (MO)
- Missing Materials (MM)
- Test and Sampling
- Machine's Microstoppages
- Corrective Maintenance: Total/ Partial Failures: *Down*
- Corrective Maintenance: Total/ Partial Failures: *Maintenance*
- Planned Maintenance: *Maintenance*
- Waiting Tool (for tool breakdown or regeneration)
- Blocking and Starvation due to failures of manufacturing system.
- Rejected in startup
- Rejected/ Reworked in normal production
- Microstoppages during production
- Strikes
- Stoppages worker

La Tabella 5.3: Descrizione degli stati manifatturieri descrive il significato di ciascuno stato manifatturiero. Essa riporta in prima colonna il nome dello stato, nella seconda la sua descrizione, nella terza la grandezza rilevata per il calcolo degli indicatori che utilizzeranno tali stati manifatturieri (all'interno del tempo complessivo T di monitoraggio) per il quale la macchina ha assunto il determinato stato, nella quarta colonna le variabili di II livello associate allo stato manifatturiero. I campi contrassegnati in grigio all'interno della quarta colonna *non sono variabili* di II livello, ma costituiscono per la trattazione dei *parametri* (dal momento che essi non sono condizionabili attraverso leve di management in uno *scope* di condizioni di inefficienza che non esce al di fuori dal management dello stabilimento produttivo). Ciononostante essi sono stati inseriti nella tabella per una maggior comprensione delle relazioni di causa-effetto dei consumi energetici, ma non trattati nell'ambito della generazione degli Energy KPI poiché *out of scope*.

Tabella 5.3: Descrizione degli stati manifatturieri per il caso 1.

Nome Manufacturing State	Descrizione	Grandezza rilevata (in T)	Variabile di II livello
Blocking & Starvation (B&S) for Production Scheduling	Idling causato da motivi gestionali, pertinenti alla programmazione della produzione ( <i>Loading e Operation sequencing</i> ).	$T_{bsps}$ Tempo in <i>blocking &amp; starvation for production scheduling</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● qualità delle regole di loading e di dispatching</li> <li>● dimensione dei buffer di sistema</li> <li>● throughput</li> <li>● <i>tempi di ciclo dei pezzi del part mix</i></li> </ul>
Waiting Tool	Idling causato	$T_{wttm}$	● dimensionamento

(missing tool in tool buffer)	dall'attesa di un utensile mancante nel tool buffer della macchina	Tempo in <i>waiting tool for tool management</i> (normalmente stimato)	tool buffer a bordo macchina (magazzini primari) e magazzino centrale ● sistema di handling degli utensili (automatico o manuale), gestione degli utensili
Daily Starting	Se l'azienda lavora su 1 o 2 turni al giorno le macchine sono riavviate giornalmente. Se l'azienda lavora su 3 turni con 5 giorni lavorativi si ha un riavvio dopo il weekend	$T_{\text{rampup}} * N_{\text{st}}$ Tempo di ramp up per numero di avvii	● turnazione dello stabilimento
Starting post Holidays	Avvii della macchina dopo le festività	$N_{\text{sph}} * T_{\text{rampup}}$ Numero avvii post holidays per il tempo di ramp up	● <b>calendario</b>
Set-up	Cambio utensile	$T_{\text{su}}$ Tempo di set up: è il tempo di cambio utensile truciolo-truciolo (ISO10701-9)	● <b>mix produttivo</b> ● sistemi per l'ottimizzazione del numero di cambi utensile
Missing Orders (MO)	L'inutilizzo della macchina per MO comporta attese	$T_{\text{mo}}$ Tempo <i>missing orders</i>	● <b>domanda del cliente e frequenza degli ordini</b> ● Master Production Schedule (MPS)
Missing Materials (MM)	L'inutilizzo della macchina per MM comporta attese	$T_{\text{mm}}$ Tempo <i>missing materials</i>	● <b>affidabilità del fornitore a monte (interno o esterno)</b> ● procedure e criteri di scelta del fornitore da parte della funzione Acquisti
Test & Sampling	La macchina processa per prove e campionature	$T_{\text{ts}}$ Tempo <i>test &amp; sampling</i> .	● richieste dalla Progettazione



		Tempo totale di processamento dei pezzi per test e campionature. Si ipotizza non facciano parte dei pezzi del part mix	
Machine's Microstoppages	Microfermate	$T_{micro}$ Tempo complessivo perso per micro fermate imputate alla macchina	<ul style="list-style-type: none"> <li>●età e usura della macchina</li> <li>●qualità dei piani di manutenzione preventiva</li> <li>●molteplici fattori</li> </ul>
Corrective Maintenance: Total/Partial Failures in <i>Down</i>	Tempo in correttiva durante il quale la macchina permane in stato di <i>Down</i> <sup>50</sup>	$T_{down}$  Composto da: Tempo di Ritardo Gestionale + Tempo Diagnosi + Tempo Ritardo <sup>51</sup> Logistico  $N_{spf} * Trampup$ Numero starting post failure (nel caso di alcuni tipi di guasti totali)	<ul style="list-style-type: none"> <li>●qualità dei piani di manutenzione preventiva</li> <li>● training manodopera: tempestività degli operatori nel riconoscere e segnalare i guasti</li> <li>● training manutentori: tempestività della squadra di manutenzione a giungere sul posto</li> </ul>
Corrective Maintenance: Total/Partial Failures in <i>Maintenance</i>	Tempo in correttiva durante il quale la macchina permane in stato di <i>Maintenance</i>	$T_{maint}$  Composto da: Tempo Tecnico di Riparazione + Tempo di Rimessa in servizio	<ul style="list-style-type: none"> <li>●entità del guasto</li> <li>● training manutentori: tempestività di riparazione della squadra di manutenzione</li> </ul>
Planned Maintenance	Tempo in preventiva durante il quale la macchina permane in stato di <i>Maintenance</i>	$TTR_p$ Tempo tecnico di riparazione degli interventi preventivi	<ul style="list-style-type: none"> <li>● training manutentori: della rapidità negli aggiustamenti</li> </ul>
Waiting Tool for	La rottura	$T_{wtbr}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>●usura dell'utensile</li> </ul>

<sup>50</sup> Si vedano gli stati manifatturieri ricavati dalla letteratura a pag.144

<sup>51</sup> Si veda "Principi generali di gestione della manutenzione " pag. 97, di Furlanetto, Garetti, & Macchi

tool breakdown or regeneration	dell'utensile comporta un'attesa per la macchina, così come la sua rigenerazione, nel caso in cui non vi sia un'altra copia dell'utensile a bordo macchina	Tempo di <i>waiting tool for breakdown or regeneration</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● frequenza di rigenerazione dell'utensile</li> <li>● dimensionamento tool buffer a bordo macchina (magazzini primari) e magazzino centrale</li> <li>● sistema di handling degli utensili (automatico o manuale), gestione degli utensili</li> <li>● profondità di passata, lavorazioni eseguite su materiali particolari</li> </ul>
Blocking & Starvation due to failures of manufacturing system	Se le stazioni operative non sono sufficientemente disaccoppiate guasti ad altri elementi del sistema (es. macchine a monte e a valle) possono comportare attese della macchina.	$T_{bssf}$ Tempo di <i>blocking &amp; starvation for system's failures</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● età e usura delle macchine e componenti del sistema produttivo</li> <li>● dimensione dei buffer di sistema</li> <li>● le variabili di II livello riferite alla manutenzione correttiva</li> </ul>
Rejected in start up	Scarti durante lo start up	$Q_{rs}$ Quantità di scarto in avviamento	<ul style="list-style-type: none"> <li>● età e usura della macchina</li> <li>● tolleranze richieste nei pezzi finiti</li> </ul>
Rejected/ Reworked in normal production	Scarti e ricircoli durante la normale produzione.	$Q_{rej}, Q_r$ Quantità di scarto/ricircolo durante la produzione	<ul style="list-style-type: none"> <li>● età e usura della macchina</li> <li>● Quality Management</li> </ul>
Workers' Stoppages (during production or in shift change)	Microfermate e tempi morti della manodopera che comportano attese per la macchina.	$T_{sw}$ Tempo Microfermate worker, imputate agli operatori	<ul style="list-style-type: none"> <li>● produttività della manodopera</li> </ul>
Strikes	Scioperi e cause sindacali in orario lavorativo (impianti	$T_{strike}$ Tempo in sciopero	<ul style="list-style-type: none"> <li>● disagio socio-economico</li> <li>● stipendio,</li> </ul>

	attivi)		sicurezza sul lavoro
--	---------	--	----------------------

Sulla base degli stati manifatturieri appena formalizzati, si ritiene opportuno una creazione di cluster *ad hoc* (ovvero categorie di cause, o cause primarie, in riferimento alla terminologia dei diagrammi di Ishikawa), distinta in alcuni punti dalle cause primarie standard di misurazione, ambiente, manodopera, metodi, macchine e management (Ishikawa, 1969) (si veda Figura 3.3 a pag.101). Questa scelta è motivata dal fatto che attraverso tale clusterizzazione ad hoc gli stati manifatturieri possano essere inclusi all'interno di uno ed un solo cluster, al quale sia possibile associare una responsabilità univoca del consumo energetico.

I cluster di responsabilità aziendale formulati per gli stati manifatturieri definiti sono dunque:

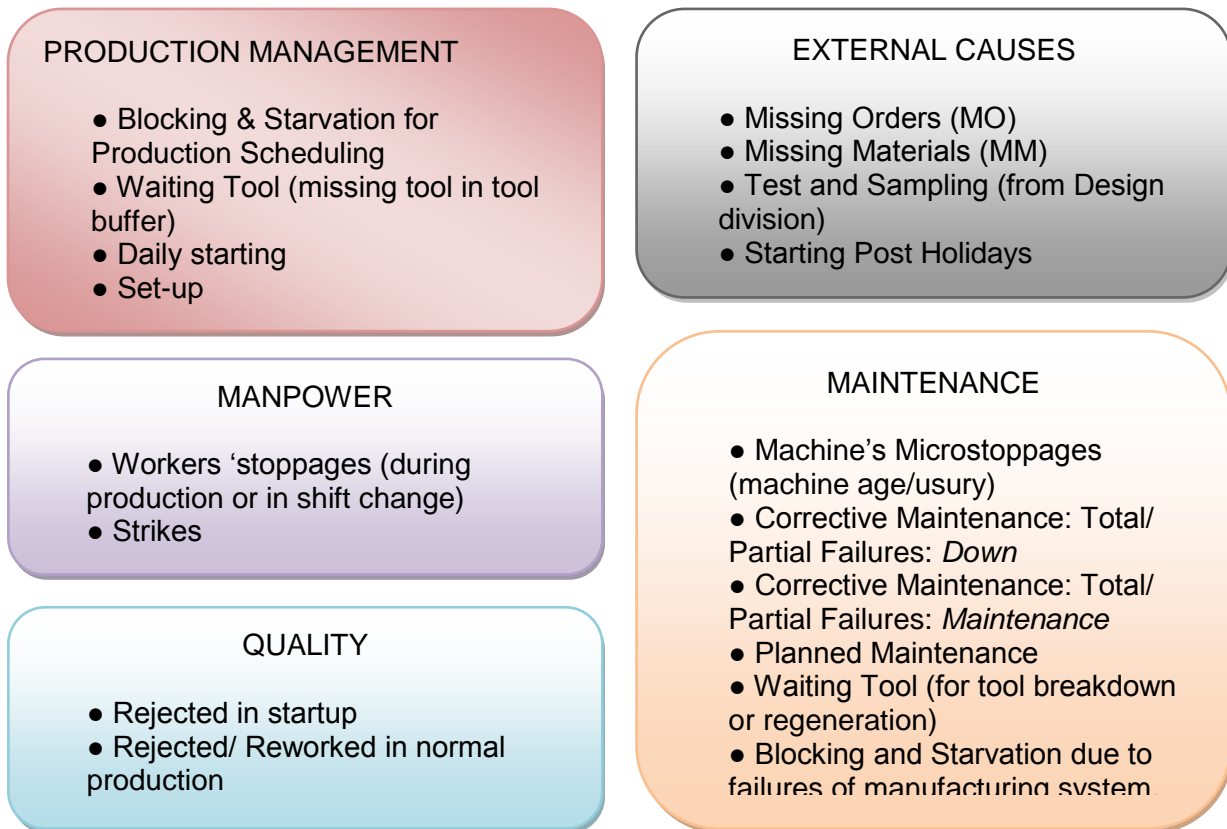
- Production Management
- Maintenance
- Quality
- Worker
- External Causes<sup>52</sup>

Nello step corrente ci si limita a includere gli stati manifatturieri in suddetti cluster, mentre l'individuazione degli attori e delle figure all'interno dell'organizzazione a cui attribuire ciascun cluster sarà trattato nello step 6 della metodologia, in sezione 5.7: *Step 6- Energy KPI System Design & Implementation*.

Gli stati manifatturieri sono così raggruppati:

---

<sup>52</sup> Per *cause esterne* si fa riferimento a cause riconducibili ad attori differenti da quelli associati agli altri cluster definiti, come ad esempio la programmazione della produzione o l'ingegneria di manutenzione. Le cause esterne sono ad ogni modo contemplate dal momento che, rendendo manifesto l'impatto del consumo energetico associato alle variabili di questo cluster tramite gli Energy KPI, il management sia invogliato a coinvolgere altre figure esterne (clienti, progettazione, ecc.) verso obiettivi di energy saving.



La Figura 5.6 alla pagina seguente illustra il diagramma di Ishikawa per il caso 1, che descrive i cluster di responsabilità come categorie di cause, gli stati manifatturieri come cause primarie e le variabili di II livello come cause secondarie. Per garantire la leggibilità del diagramma sono state considerate le variabili di II livello più rilevanti per la trattazione, dove la “rilevanza” è data dalla possibilità di poter agire sulle variabili di II livello tramite appropriate leve di gestione per ridurre gli intervalli di tempo associati agli stati manifatturieri.

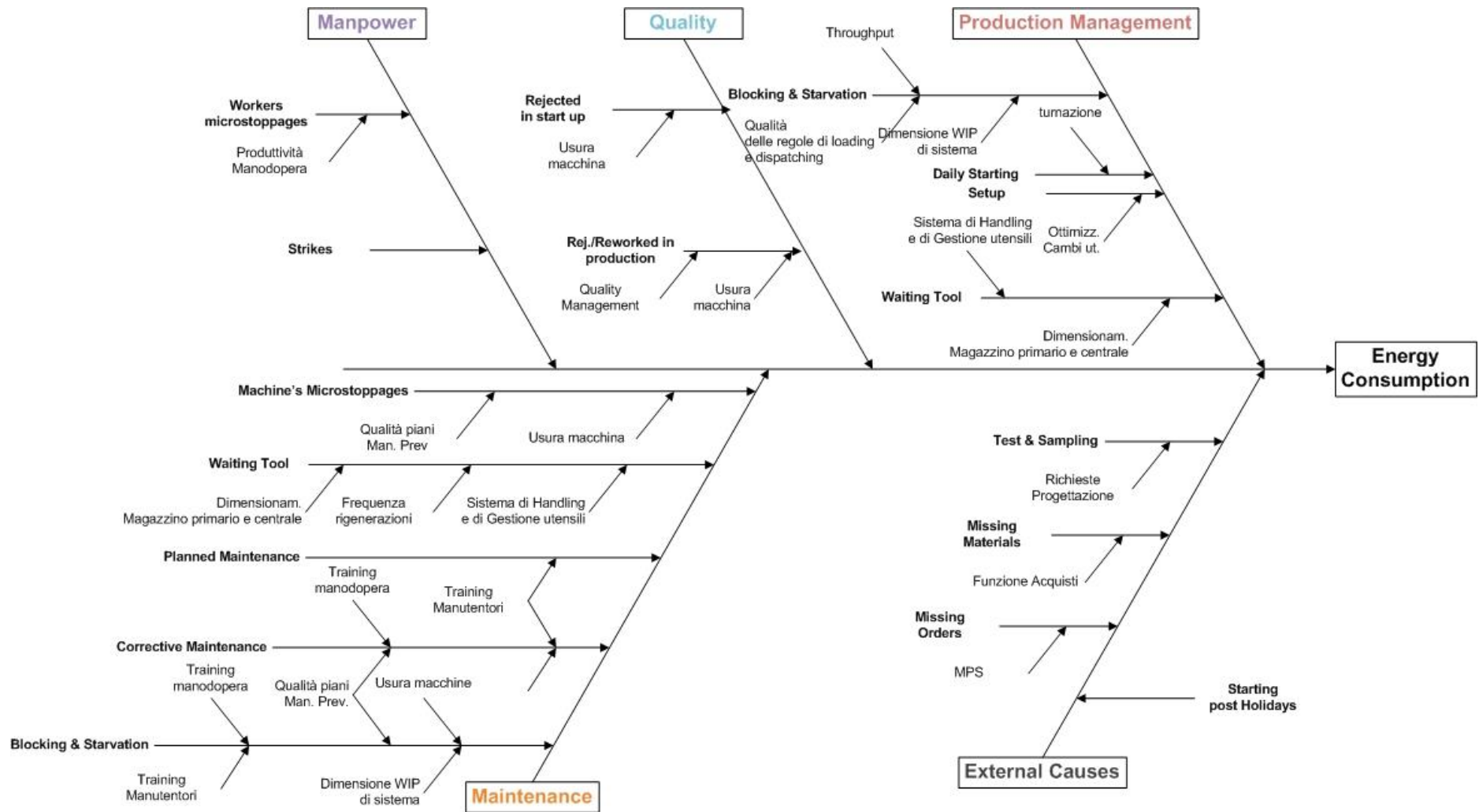


Figura 5.6: Diagramma di Ishikawa per il caso 1: Variabili di consumo energetico.

Risulta inoltre molto funzionale al management, ai fini di una gestione più consapevole del sistema produttivo sia sotto una prospettiva energetica che una prospettiva manifatturiera, una classificazione degli stati manifatturieri sulla base della possibilità di pianificare o meno la durata dello stato. La classificazione stabilisce se uno stato è:

- pianificato
- non pianificato, e in tal caso:
  - prevedibile
  - non prevedibile.

In questo modo si può valutare in sede di confronto tra valore di indicatori a consuntivo e valore degli indicatori stimati se sia le differenti operations sono state:

- “fuori controllo”- ovvero è stata riscontrata una deviazione inaspettata del intervallo temporale, o del consumo energetico associato all’attributo di prevedibilità;
- mal pianificate - è stata fatta invece una cattiva pianificazione (deviazione inaspettata del intervallo temporale, o del consumo energetico associato all’attributo di pianificazione).

Si ritiene opportuno ad ogni modo non eseguire in sede di illustrazione della metodologia generale la classificazione completa di tutti gli stati manifatturieri, in quanto la prevedibilità e l’imprevedibilità di alcuni stati può dipendere dal caso specifico dello stabilimento. La

Tabella 5.4 fornisce un esempio di categorizzazione per gli stati manifatturieri del cluster di *Maintenance*, nell’ipotesi di un processo stabile in termini di guasti alla macchina (mediamente il Mean Time To Failure della macchina è stabile nel tempo) e rotture dell’utensile (mediamente il sistema di handling degli utensili impiega un tempo stabile di ripristino dell’utensile nuovo).

Tabella 5.4: Esempio di categorizzazione degli stati manifatturieri nel caso del cluster di Maintenance.

Manufacturing State	Planned	Unplanned	
		Predictable	Unpredictable
MAINTENANCE			
Planned M.	X		
Corrective M.		X	
Microstoppages (physic/age/usury of machine)			X
Waiting for Tool Breakdown		X	

### 5.3.2: Caso 2: Time View OEE-based

L'OEE, sviluppato da Seiki Nakajima (1988) è adottato per lo studio delle cause di riduzione dell'efficienza di macchine e impianti. In particolare, si parla di Overall Equipment Effectiveness se le performance di efficienza sono valutate in relazione al tempo in cui l'impianto è destinato a funzionare (detto solitamente Loading Time o Running Time). Si parla invece di Total Effective Equipment performance (TEEP) se le performance sono valutate in relazione al tempo a calendario. La Figura 5.7 mostra il processo di calcolo dell'OEE nelle sue tre componenti di Manutenzione/Disponibilità, Produzione, e Qualità, ricavate sottraendo progressivamente determinati intervalli temporali di perdite causate da inefficienze di sistema (rispettivamente Downtime losses, Speed losses, e Defect/Quality losses).

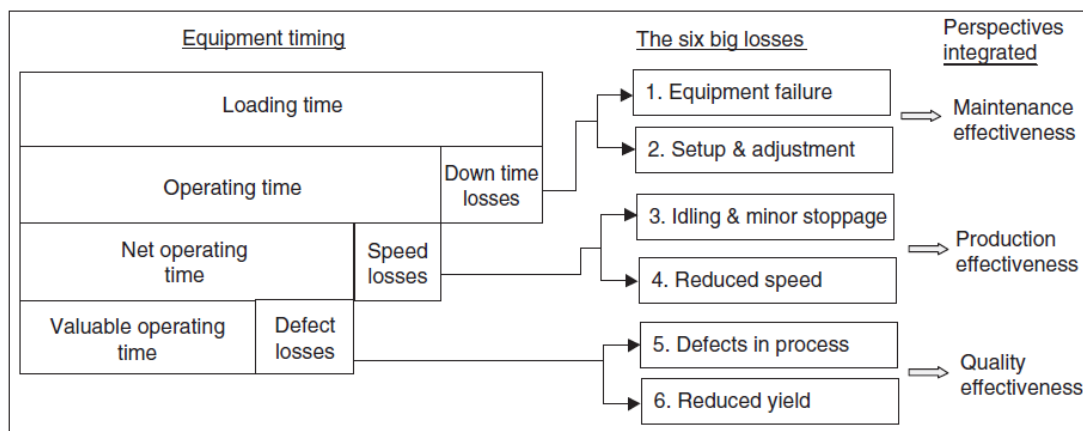


Figura 5.7: "OEE measurement tool and the perspectives of performance integrated in the tool". Fonte: (Muchiri & Pintelon, 2008).

Molti studiosi hanno trattato, elaborato, modificato l'OEE, dal momento che esso non è definito in qualità di standard, e a tal proposito esistono tentativi di omogeneizzazione delle modalità di calcolo. Ad ogni modo ciò implica l'impossibilità di comparare diversi OEE se sono il risultato di algoritmi diversi. In questa trattazione si fa riferimento all'OEE nella sua più classica delle formule, in cui l'indicatore è espresso attraverso il contributo percentuale di *Availability*, *Performance*, *Quality* (5.1):

$$OEE = Availability \times Performance \times Quality \quad (5.1)$$

dove:

$$Availability = \frac{Operating\ time}{Loading\ time} \quad (5.2)$$

$$Performance = \frac{Total\ production}{Theoretical\ Production}$$

(5.3)

In particolare, la percentuale che esprime la performance produttiva è calcolata tramite il seguente rapporto:

$$Performance = \frac{Total\ production \times Ideal\ Cycle\ Time}{Operating\ time}$$

oppure:

$$Performance = \frac{Total\ production}{Operating\ time \times Ideal\ Throughput\ Time} \quad (5.4)$$

E infine:

$$Quality = \frac{Good\ production}{Total\ Production} \quad (5.5)$$

Da ciò ne consegue che:

$$OEE = \frac{Good\ production}{Loading\ Time \times Ideal\ Throughput\ Time} \quad (5.6)$$

La 5.6 spiega efficacemente come l'OEE sia il rapporto tra la produzione “buona”, ottenuta, e la produzione teoricamente ottenibile nel tempo disponibile dell'impianto se esso avesse lavorato in condizioni ideali: senza guasti, attese, scarti, secondo un tempo di ciclo ideale (o throughput) ideale.

In questo secondo caso il processo di individuazione degli stati manifatturieri e dei cluster risulta estremamente semplificato. Come è facile notare dalla figura, la definizione degli stati manifatturieri (ovvero le Six Big Losses) che impattano sulle performance di consumo energetico e la loro clusterizzazione (le tre categorie di perdite *Downtime*, *Speed* e *Defect Losses*) è già insita all'interno del modo in cui l'indicatore è stato progettato, dal momento che ciascuna delle sei grandi perdite comporta un'inefficienza oltre che time-based, anche energy-based; ed è imputabile al modo in cui sono condotte le operations e la gestione della produzione all'interno del sistema produttivo.

Dal momento che gli stati manifatturieri e i relativi cluster per il caso 2 *OEE-based* sono stati già definiti, si può procedere alla descrizione degli stessi attraverso la Tabella 5.5. In questo secondo caso è facile constatare la natura più aggregata e grossolana degli stati manifatturieri rispetto al caso 1 precedentemente illustrato (6 stati manifatturieri del caso 2 contro 18 stati manifatturieri del caso 1): ciò comporterà conseguentemente un maggior numero



di variabili di II livello per ogni stato manifatturiero (le variabili definite in Tabella 5.3: Descrizione degli stati manifatturieri per il caso 1. si “aggregano” tra loro).

Note per la comprensione della Tabella 5.5:

1. In quarta colonna sono state riportate le variabili di II livello più significative –in termini di possibilità di intervento attraverso leve di management–rispetto all’insieme delle variabili illustrate in Tabella 5.3: Descrizione degli stati manifatturieri per il caso 1.;
2. Le variabili di II relative agli stati di *Idling & minor stoppage* e *Reduced Speed* sono state incorporate per favorire la leggibilità della tabella, viste alcune comunanze tra variabili che causano fermate minori e fermate più consistenti.

Tabella 5.5: Descrizione degli stati manifatturieri per il caso 2.

Nome Manufacturing State	Descrizione	Grandezza rilevata (in T)	Variabili di II livello
Equipment Failure	Failure e guasti che causano l’indisponibilità della macchina. (Si suppone interventi di sola manutenzione correttiva, dunque non programmati).	DT <sub>g</sub>  Downtime di guasto  Intervallo di tempo che fa dall’istante di rilevazione del guasto a istante di rimessa in servizio (all’interno del tempo richiesto di funzionamento)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● età e usura della macchina</li> <li>● <b>entità del guasto</b></li> <li>● training manutentori: tempestività di riparazione della squadra di manutenzione</li> <li>● qualità dei piani di manutenzione preventiva</li> <li>● tempestività degli operatori nel riconoscere e segnalare i guasti</li> <li>● usura dell’utensile, ecc.</li> </ul>
Set up & adjustment	Comprende gli attrezzaggi, i cambi utensili, le regolazioni, i test.	T <sub>su</sub> : tempo di set up T <sub>a</sub> : tempo <i>adjustment</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● training manutentori: della rapidità negli aggiustamenti</li> <li>● sistemi per l’ottimizzazione del numero di cambi utensile,</li> <li>● richieste dalla Progettazione</li> <li>● <b>mix produttivo</b> ecc.</li> </ul>

Idling & minor stoppage	Idling della macchina, brevi malfunzionamenti, brevi interruzioni della produzione	Si considerano due quantità: $Q_t$ e $Q_r$ , rispettivamente la quantità di pezzi che si sarebbe prodotta teoricamente (al ritmo standard, senza alcun rallentamento) e la quantità realizzata in condizioni reali.	<ul style="list-style-type: none"> <li>● produttività della manodopera</li> <li>● qualità delle regole di loading e di dispatching</li> <li>● dimensione dei buffer di sistema</li> <li>● throughput</li> <li>● domanda del cliente e frequenza degli ordini</li> <li>● tempi di ciclo dei pezzi del part mix, ecc.</li> </ul>
Reduced speed	Rallentamenti di varia natura che causano una differenza tra la velocità di progettazione e quella effettiva		
Defects in process	Difetti durante la normale produzione	$Q_{dp}$ Una parte della quantità realizzata viene scartata in produzione	<ul style="list-style-type: none"> <li>● età e usura della macchina</li> <li>● quality management, ecc.</li> </ul>
Startup rejects	Scarti da avviamento	$Q_{sr}$ Una parte della quantità realizzata viene scartata in avviamento	<ul style="list-style-type: none"> <li>● età e usura della macchina</li> <li>● tolleranze richieste nei pezzi finiti, ecc.</li> </ul>

Si evince dunque la presenza di un chiaro trade-off tra semplicità di calcolo dell'indicatore OEE (e quindi nella maggior possibilità di reperire e stimare i dati necessari) e l'accuratezza del processo di attribuzione delle cause di inefficienza (variabili di II livello per ciascuno stato manifatturiero) e conseguentemente l'accuratezza del processo di individuazione delle responsabilità di consumo energetico attraverso gli Energy KPI che si svilupperanno da questa *time view*. Questa affermazione motiva la scelta di non illustrare il diagramma di Ishikawa che illustra le relazioni di causa (stati manifatturieri e variabili di II livello) ed effetto (consumo energetico) per il caso 2.

#### 5.4: Step 4 - Cross View di collegamento tra Time View ed Energy View

Individuati in maniera esaustiva gli stati energetici e gli stati manifatturieri della risorsa, si procede alla fase di collegamento tra i due "visioni" della stessa, (si veda ). Ciascun link della cross view è un'informazione che sussiste in virtù di uno specifico impatto che uno stato manifatturiero ha su un determinato stato energetico, comprovato o dalla letteratura o dall'evidenza sullo specifico caso, chiaramente prescindendo da una buona conoscenza del funzionamento

energetico delle macchine utensili. Si ricorda che le relazioni di causa effetto tra le due *view* sono:

- di natura 1:n, ovvero, uno stato manifatturiero può implicare differenti profili energetici a seconda dei casi d'uso e delle situazioni di produzione;
- dirette, ovvero esiste un impatto diretto tra stato manifatturiero e stato energetico, senza passaggi "intermedi";
- positive –maggiore è il tempo nel quale la risorsa funziona ad un certo stato manifatturiero, maggiore è il consumo energetico relativo all'energy state associato.

La Figura 5.8 a pag. 160 illustra la cross view effettuata per il caso 1 *productivity-based*, mentre la figura 5.9 a pag.161 illustra la cross view effettuata per il caso 2 *OEE-based*. Le associazioni effettuate sono state dapprima sviluppate autonomamente e poi raffinate tramite un confronto con esperti. Si riportano ora alcune note per una corretta interpretazione della cross-view del caso 1 e in alcuni punti anche per il caso 2.

Progettazione della cross view:

1. nel caso 1 ciascun box di stato manifatturiero è contrassegnato dal colore relativo al cluster di appartenenza (si veda pag.152); mentre nel caso 2 i box sono racchiusi nei cluster costituiti dalle tre categorie di perdite dell'OEE;
2. poiché gli Energy KPI sono indicatori di consumo energetico derivanti dalla cross view, lo stato di *Off* non viene considerato (sia nel caso 1 che nel caso 2), dal momento che equivale ad un consumo energetico pari a zero. Se per esaustività si volesse collocarlo all'interno della cross view, l'unico stato manifatturiero ad esso connesso sarebbe quello di Total Failure, giacché in alcune situazioni "estreme" si potrebbe avere un completo spegnimento della macchina;
3. essendo la potenza massima del ramp down molto bassa (prima di decrescere verso la potenza nulla), esso non viene considerato nella cross view (analogamente come per il caso 2).
4. per favorire la leggibilità della cross view attraverso un minor numero di box lo stato di *Blocking & Starvation* è stato aggregato con lo stato di *Waiting Tool*, sia per il cluster di *Production Management* sia per quello di *Maintenance*, dal momento che le associazioni con gli stati energetici sono del tutto identiche;
5. sono stati trascurati gli scioperi (*Strikes*), idealmente incorporati nello stato *Workers'Stoppages*;

6. *Missing Orders* e *Missing Materials* sono stati aggregati nello stesso box dal momento che le associazioni con gli stati energetici sono identiche.

Si procede ora ad appurare alcune particolari associazioni effettuate nella cross view. Si tralascia la spiegazione dei link più banali. Il caso 2, essendo più semplice del caso 1, risulterà così automaticamente spiegato:

1. I box di *Partial Failures* e *Total Failures* sono riferiti esclusivamente ad una manutenzione correttiva e comprendono sia lo stato manifatturiero relativo al *Maintenance* che quello relativo al *Down*, per una questione di leggibilità della cross view. Le associazioni energetiche non sono però uguali in un caso e nell'altro: in particolare, nel caso di stato di *Maintenance* (riparazione e rimessa in servizio) il power requirement associato sarà quello di *Maintenance*, nel caso di stato di *Down* (rilevazione del guasto fino all'inizio intervento) la macchina permane con buona approssimazione in *Idle* fino all'inizio intervento;
2. Alcune tipologie di guasto possono comportare un sovra consumo della potenza di lavorazione: ciò motiva l'associazione degli stati di *Partial Failures* e *Total Failures* con il processing;
3. I box relativi agli *Idling* (primi due box in figura) sono associati sia allo stato energetico di *Idle* che a quello di *Stand-By*, dal momento che esistono situazioni in cui centri di lavoro tecnologicamente più avanzati si portano autonomamente in stato di *Stand-By* se l'*idle* perdura per più di un tempo  $t^*$

5.4.1: Caso 1: Cross View productivity-based

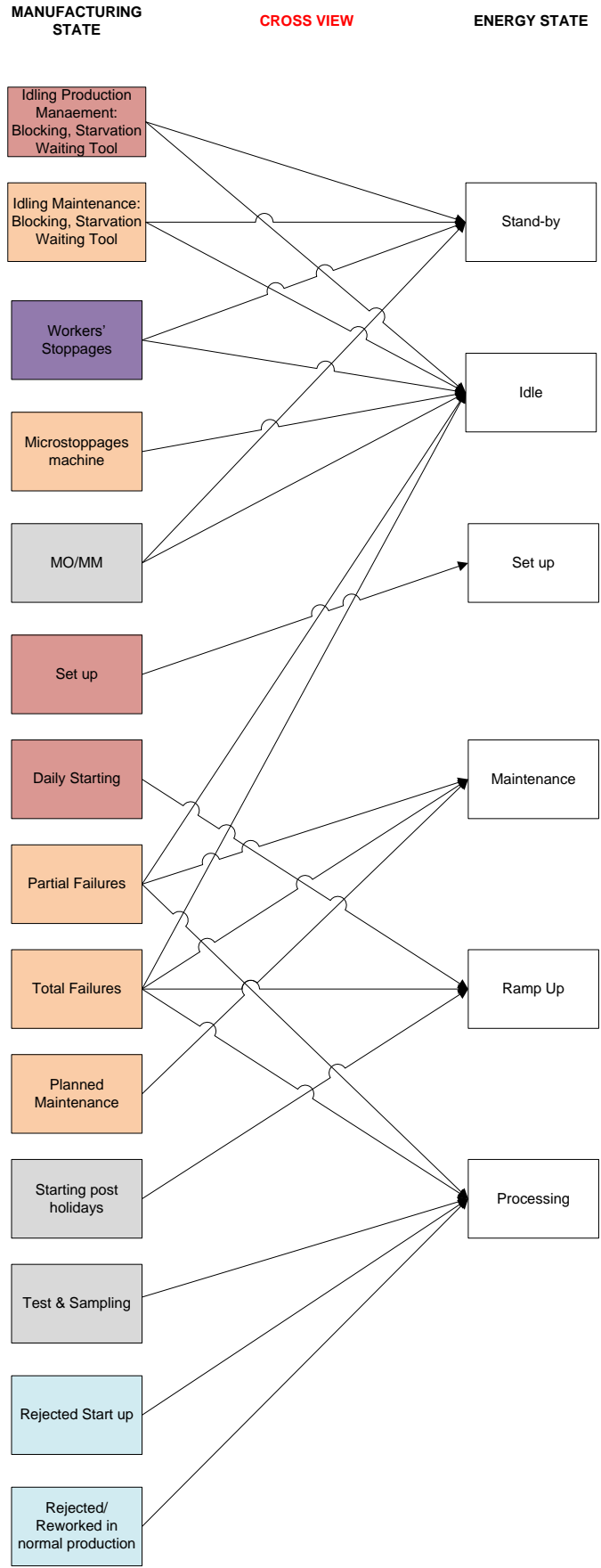
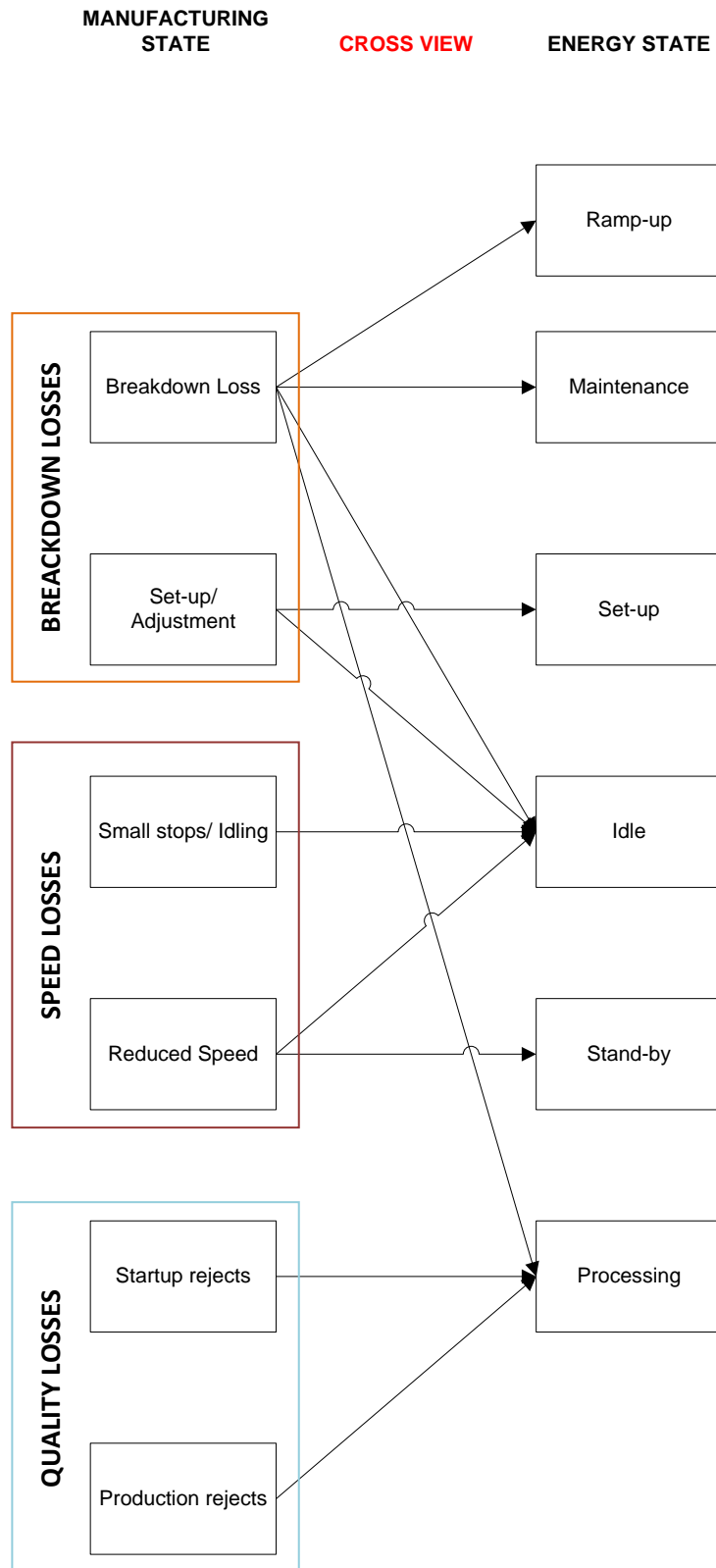


Figura 5.8: Cross view caso 1.



5.4.2: Caso 2: Cross View OEE-based

Figura 5.9: Cross View caso 2.

Inoltre, dopo aver effettuato la cross view e identificato tutte le relazioni di causa effetto, è possibile, in via del tutto facoltativa e a discrezione degli utilizzatori della metodologia, usufruire ancora una volta dei diagrammi di Ishikawa per rappresentare i link di causa effetto individuati nella cross view, qualora in alcuni casi (come nel caso 1) l'elevato numero di link possa rendere difficile la comprensione del sistema in termini di duplice view. In questa particolare applicazione l'effetto del singolo diagramma di Ishikawa è costituito dallo specifico stato energetico. E' possibile teoricamente realizzare un diagramma di Ishikawa per ogni stato energetico.

### 5.5: Step 5 - Energy Diagram e generazione degli Energy KPI

Si illustrerà in primis cosa accade tipicamente all'interno del *monitoring* dei consumi energetici da parte del SI, in modo tale da poter inserire e comprendere il contributo apportato dalla visualizzazione dei consumi energetici attraverso l'Energy Diagram. Ciò che viene eseguito è un'aggregazione degli intervalli temporali per i quali la macchina ha assunto un certo stato energetico [W] nel tempo T di monitoraggio. La Figura 5.10 mostra un esempio di monitoraggio dettagliato dell'andamento della potenza nel tempo a partire dall'istante di accensione della macchina utensile. L'andamento varia in funzione dei differenti stati manifatturieri, ad esempio la produzione di un *item1*, o il set-up per il passaggio dall'*item1* all'*item2*, ecc. Il consumo energetico complessivo nel periodo T è chiaramente dato dall'integrale della funzione di potenza fino al tempo T. Il grafico a destra mostra il risultato di questo processo di aggregazione: ipotizzando, per semplicità di rappresentazione, valori medi (e quindi costanti) delle differenti potenze, il consumo energetico nel tempo T relativo a ciascun *power requirement* (contraddistinto in figura da un colore diverso) è definito dall'area del rettangolo.

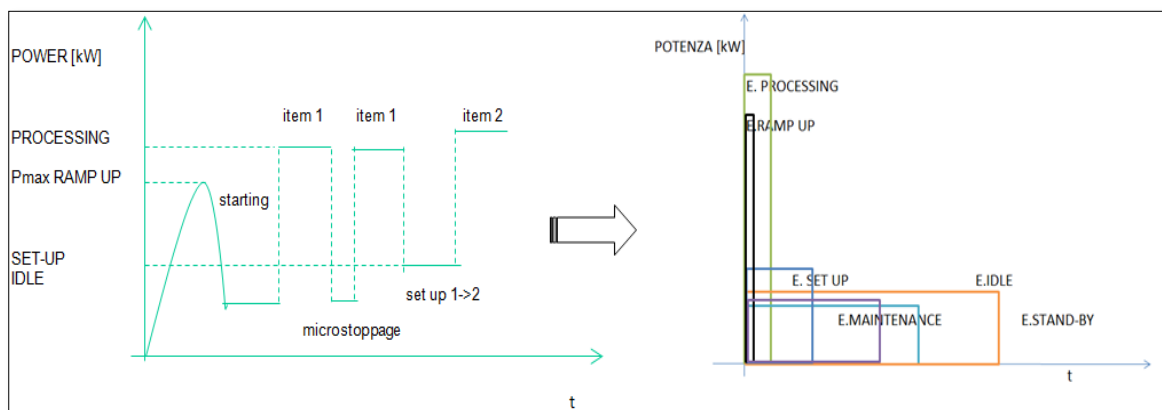


Figura 5.10: Rappresentazione qualitativa dell'andamento della potenza nel tempo di una macchina utensile e visualizzazione dei consumi energetici per ciascun power requirement

Si nota come esistano power requirement che seppur alti in termini di kW hanno avuto un'occorrenza inferiore (esempio del *processing*), mentre invece power

requirement più bassi ma con un'occorrenza maggiore nel tempo (esempio dell'*idle*). L'esistenza di queste circostanze dipende chiaramente da cosa succede alla macchina e al sistema produttivo all'interno del quale essa opera. Si potrebbe inoltre rappresentare qualitativamente il contributo percentuale del consumo energetico relativo ai diversi power requirement sul consumo totale in T (in riferimento alla Figura 5.10, quest'ultimo equivale alla somma delle aree di tutti i rettangoli). La Figura 5.11 mostra questa rappresentazione in termini qualitativi (i rapporti tra i diversi consumi energetici sono arbitrari).

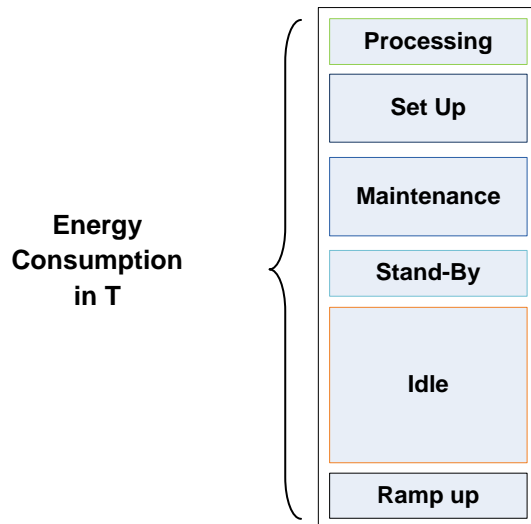


Figura 5.11: Contributo del consumo relativo ai diversi stati energetici sul consumo totale del periodo T.

In letteratura approcci di questo tipo sono stati utilizzati per valutare come -ad esempio- un elevato consumo percentuale della macchina in stato di idle piuttosto in quello di processing (Gutowski, Dahmus, & Thiriez, 2006). Altri esempi sono la generazione di indicatori che si su un approccio come quello della Figura 5.11, calcolando il contributo di ciascuno stato energetico sul consumo totale per valutare la bontà di diversi scenari produttivi in termini di energy saving (Vallo, 2009). La generazione dei KPI attraverso questo approccio peccerebbe nell'obiettivo fornire un supporto decisionale all'EM (se l'obiettivo è chiaramente quello di progettare un decision support tool tramite i soli KPI), dal momento che, senza una cross-view non si potrebbero contestualizzare le motivazioni di un *idle X%* più elevato di un *processing*, o ad esempio un *idle Y%* più elevato rispetto al periodo precedente. Si ritiene dunque necessaria per la trattazione la progettazione di un Energy Diagram a supporto del processo di generazione degli Energy KPI. Si ricorda la definizione di Energy Diagram:

Per *Energy Diagram* si intende un istogramma di natura qualitativa che rappresenti il contributo dell'energia spesa dalla macchina in ciascuno degli stati manifatturieri sul consumo totale nel periodo di monitoraggio T, secondo una struttura decrescente "a matryosca" che renda possibile, nonché intuitiva, la costruzione degli Energy KPI attraverso rapporti tra i diversi "pilastri" dell'istogramma.



I “pilastri” che verranno rapportati per la costruzione degli indicatori sono chiaramente selezionati sulla base dello scopo di analisi dell’indicatore<sup>53</sup>. Gli specifici indicatori ottenuti tramite questo approccio sono inficiati dunque dalla modalità di costruzione dell’Energy Diagram, che a sua volta dipende dalla specifica *time view* adottata nello step 3. Si procede ora alla definizione e descrizione degli Energy Diagram per il caso 1 e il caso 2, grazie ai quali si giunge alla progettazione degli Energy KPI. Si ricorda ancora una volta che la costruzione degli Energy Diagram è possibile solo conoscendo il consumo energetico consuntivo nel periodo T attraverso un PLC di macchina o una specifica campagna di misurazione, dal momento che non esiste un range di energia fissato (come nel caso temporale, ad esempio il tempo solare o il tempo a calendario lavorativo) all’interno del quale lavorare. Ciò costituisce la limitazione più forte di tutta la metodologia, perlomeno considerato lo stato attuale dei sistemi di monitoraggio.

### 5.5.1: Caso 1: Energy KPI sviluppati

La Figura 5.12 mostra l’Energy Diagram sviluppato per il caso 1. Il primo pilastro a partire da sinistra rappresenta il consumo energetico totale rilevato nel tempo solare T. Si procede scalando il consumo energetico imputato ai diversi stati manifatturieri attraverso la cross view effettuata nella sezione precedente, fino ad arrivare alla “valuable energy”, l’energia vendibile associata alla produzione dei pezzi senza difetti (energia di processamento attivo dei pezzi). E’ chiaro che più si riesce a ridurre le perdite associate a ciascun blocco, più si è *lean* nel consumo di energia, dal momento che il consumo energetico totale si avvicina numericamente al consumo di energia vendibile. Ciascun “blocco” del diagramma è valorizzato in termini energetici dai power requirement<sup>54</sup> derivanti dalla cross view (attraverso le frecce in figura). L’entità dei consumi energetici “scalati” nel diagramma è da considerarsi qualitativa. Si riproduce di fatto un *alter-ego energetico* del diagramma di stato dell’impianto.

Questo alter-ego comporta l’introduzione di un cambiamento del modo con il quale vengono considerate le inefficienze in ottica tradizionale time-based: due tipologie di “perdita” (ad esempio mancanza ordini e set up) di uguale entità temporale (ad esempio entrambe 2 ore in una giornata) non hanno uno stesso peso in termini di efficienza energetica (che avrebbero invece in una prospettiva di efficienza time-based), dal momento che esse sono associate ad un “peso” che è il relativo power requirement. Per questo motivo è interessante analizzare le inefficienze sotto una prospettiva energetica: l’*effort* sarà orientato a ridurre il contributo degli stati manifatturieri a più alto impatto energetico sul consumo complessivo della risorsa.

<sup>53</sup> Analogamente a quanto fatto per le rappresentazioni come il diagramma dello stato dell’impianto (si veda allegato 9 in Appendice B) e l’OEE (figura 5.7).

<sup>54</sup> Ciascun power requirement è indicato con la notazione *P.stato energetico*. Potenze variabili nel tempo come la potenza di lavorazione di ciascun pezzo o la potenza in set up sono state considerate in termini di misure medie.

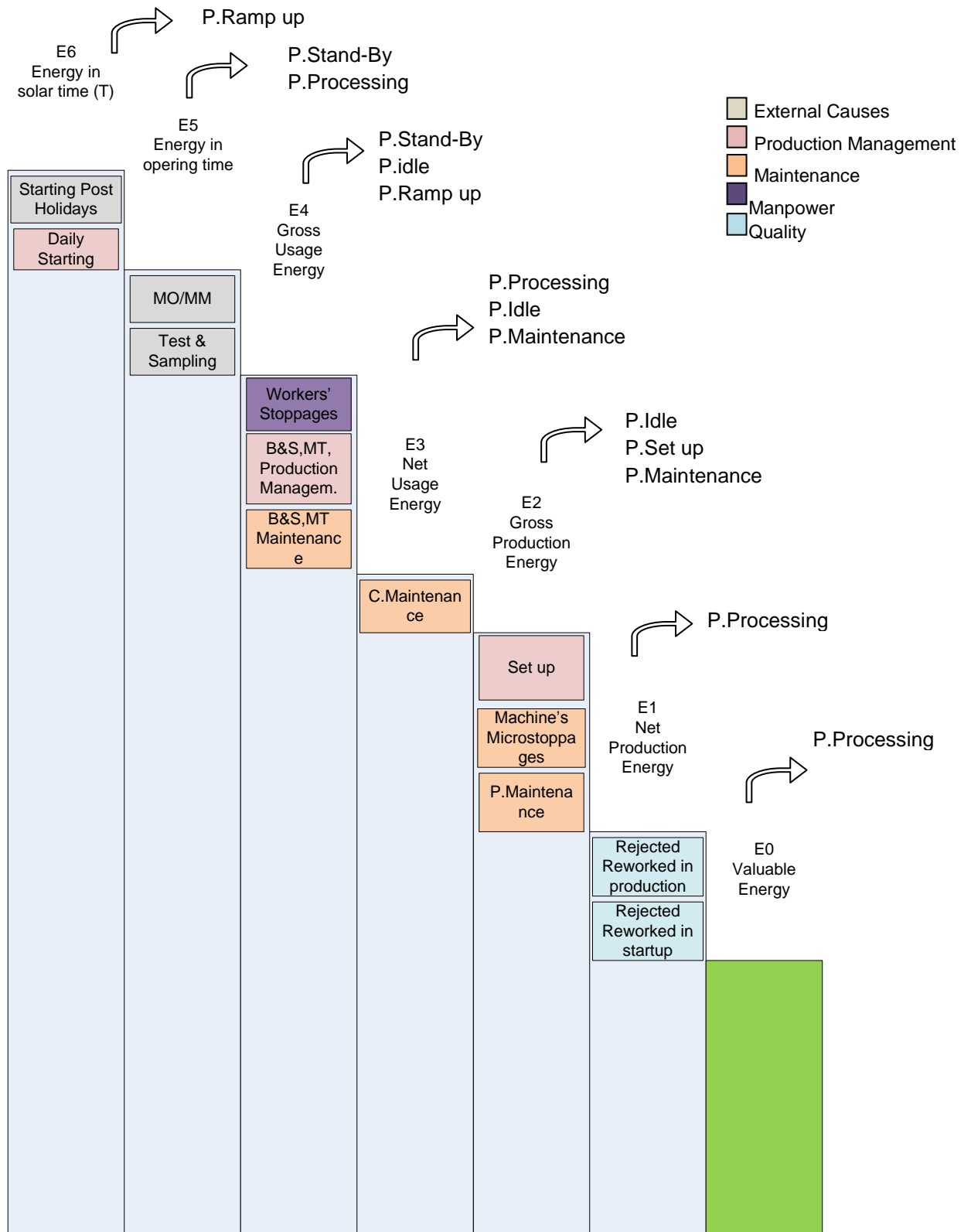


Figura 5.12: Energy Diagram caso 1.

Si procede dunque alla generazione degli Energy KPI. Si introduce la simbologia impiegata nelle formule di calcolo degli indicatori. Alcuni simboli riportati sono

stati precedentemente illustrati in Tabella 5.3 a pag.146, nell'ambito della descrizione degli stati manifatturieri per il caso 1: la terza colonna della tabella è funzionale all'individuazione delle grandezze da inserire nel calcolo degli Energy KPI.

$i$ : indice del pezzo del part mix

$n$ : numero di pezzi del part mix

$Q_{good\ i}$ : Quantità realizzata vendibile del pezzo  $i$ : pezzi "buoni" senza ricircoli precedenti

$Q_{rew\ i}$ : Quantità rilavorata

$Q_{r\ i}$ : Quantità scartata

$Q_{rs\ i}$ : Quantità scartata in startup

$T_{processing\ i}$ : Tempo di lavorazione del pezzo  $i$  del part mix<sup>55</sup>

$P_{processing\ i}$ : Potenza media di processamento del pezzo  $i$  del part mix<sup>56</sup>

$N_{ct\ i}$ : Numero di *change tool* (cambi utensile) per ciascun pezzo "i".

$T_{su}$ : Tempo unitario di set up<sup>57</sup>

$P_{Setup}$ : potenza media nel cambio utensile<sup>58</sup>

$T_{micro}$ : Tempo complessivo perso per microfermate imputate alla macchina

$P_{rampup}$ : potenza in avviamento

$T_{rampup}$ : tempo per l'avviamento della macchina<sup>59</sup>.

$N_{spf}$ : Numero di avvi *post failure*

$TTR_p$ : Tempo di riparazione degli interventi preventivi (si ipotizzano sole regolazioni)

$P_{maint}$ : potenza in esecuzione delle attività di manutenzione

$T_{maint}$ : *Tecnico di Riparazione + Tempo di Rimessa in servizio* negli interventi di manutenzione correttiva

$T_{down}$ : Tempo di Ritardo Gestionale + Tempo Diagnosi + Tempo Ritardo Logistico negli interventi di manutenzione correttiva

$P_{idle}$ : potenza in idle

$T_w$ : Tempo complessivo perso per fermate imputate agli operatori

$T_{bsps}$ : Tempo in *blocking & starvation for production scheduling*

$T_{wtm}$ : Tempo in *waiting tool for tool management*

$T_{bssf}$ : Tempo di *blocking & starvation for system's failures*

$T_{wtbr}$ : Tempo di *waiting tool for breakdown or regeneration*

$P_{standby}$ : potenza in standby

<sup>55</sup> Si intende il solo processamento del pezzo nelle sue lavorazioni, al netto dunque dei cambi utensile.

<sup>56</sup> Dal momento che  $P_{processing}$  costituisce il power requirement più alto tra quelli considerati, esso viene indicizzato con il relativo pezzo a cui si riferisce la potenza media di lavorazione, dal momento che possono esistere lavorazioni più intensive, effettuate su certi tipi di pezzo, la cui presenza può inficiare sul risultato finale di consumo energetico.

<sup>57</sup> Per rendere più chiara la lettura degli indicatori, si considera un tempo di cambio utensile medio, con la consapevolezza che esso varia in funzione della posizione in cui l'utensile da inserire si trova all'interno del tool buffer primario. Anche in questo caso, in sede di calcolo effettuato in un caso applicativo, è sempre possibile raffinare l'indicatore indicizzando il tempo di set up in funzione della sua tipologia.

<sup>58</sup> Anche in questo caso per semplificare la formulazione dell'indicatore, si ipotizza una potenza in set up media. In sede di caso applicativo essa potrà essere indicizzata in funzione della tipologia di set up.

<sup>59</sup> L'andamento della potenza in stato di ramp up è visibile in allegato a pag.. L'andamento presenta un vistoso picco, e l'energia è l'area sottesa dalla funzione di potenza nel tempo (integrale). Per non complicare la lettura degli indicatori si ipotizza una potenza media di avviamento.

$T_{mo}$ :Tempo in mancanza ordini  
 $T_{mm}$ :Tempo in mancanza materiali  
 $N_{st}$ : Numero di avvi da turnazione  
 $N_{sph}$ :Numero di avvii post holidays

Gli indicatori saranno illustrati sia nella loro formula di calcolo “estesa”, sia abbreviata (attraverso i simboli associati ad ogni colonna in Figura 5.12, che vanno da E0 a E6).

In corrispondenza degli indicatori calcolati, compatibilmente con la reale possibilità di dati a disposizione dalle aziende, verranno riportati esempi attraverso cui valutare il contributo di determinati stati puntuali sul valore totale dell’indicatore.

L’indicatore intuitivamente più semplice da ricavare è una misura di quanto si è *lean* in termini di consumo energetico, rapportando l’energia a valore aggiunto con il consumo energetico rilevato nel tempo solare:

$$Lean\ Energy\ Indicator = \frac{Valuable\ Energy}{Energy\ Consumption\ in\ solar\ time\ T} = \frac{E0}{E6} \quad (5.7)$$

ovvero:

$$Lean\ Energy\ Indicator = \frac{\sum_{i=1}^n (P_{processing\ i} \times Q_{good\ i} \times T_{processing\ i})}{Energy\ Consumption\ in\ solar\ time\ T} \quad (5.8)$$

L’indicatore illustrato è immune da variazioni della domanda, dal momento che ciò che interessa non è valutare in termini assoluti quanta energia è stata spesa per la realizzazione dei prodotti (dal momento che essa, dato un certo mix produttivo, non può essere ridotta a meno di ricorrere a tecnologie più efficienti o ottimizzazioni delle velocità di taglio), ma valutare quanto si è stati *lean* in termini energetici nella realizzazione di una produzione senza difetti, con l’obiettivo “immaginario” di far tendere questa misura quanto più possibile al valore 1. L’obiettivo non è minimizzare il consumo energetico in termini assoluti, dal momento che esiste una domanda di produzione che deve essere soddisfatta, ma è utilizzare l’energia in maniera efficiente, nella sola realizzazione di output vendibile. Per questo motivo si auspica che il valore del Lean Energy Indicator tenda ad 1.

In che modo è possibile valorizzare puntualmente le cause che determinano un aumento del consumo energetico impiegato (E6) rispetto a quello necessario per la sola realizzazione della produzione buona (E0)? Una buona risposta è costituita da un tentativo di scomposizione di tale indicatore in molteplici fattori.

Analizzando l'Energy Diagram a partire da destra, si comprende come sia facile la generazione di un secondo indicatore: l'indicatore *Energy in Quality* ( $E_{quality}$ ) rappresenta l'energia che è andata sprecata per problemi di qualità. I "problemi" del sistema produttivo, che determinano condizioni di inefficienza, sono stati illustrati schematicamente attraverso il diagramma di Ishikawa a pag. 152.

$$Energy\ in\ Quality\ (E_{quality}) = \frac{Valuable\ Energy}{Net\ Production\ Energy} = \frac{E0}{E1} \quad (5.9)$$

ovvero:

$$E_{quality} = \frac{\sum_{i=1}^n (P_{processing\ i} \times Q_{good\ i} \times T_{processing\ i})}{\sum_{i=1}^n (P_{processing\ i} \times T_{processing\ i}) \times (Q_{good\ i} + Q_{rs\ i} + Q_{r\ i} + 2Q_{rew\ i})} \quad (5.10)$$

Se il processo non prevede ricircoli ma solo scarti  $Q_{rew\ i}$  sarà pari a zero, mentre viceversa  $Q_{r\ i} = 0$ .

Si introducono due ipotesi piuttosto forti per la formula 5.10: il ricircolo realizza la rilavorazione completa del pezzo, così come lo scarto avviene alla fine di tutte le lavorazioni previste dal ciclo tecnologico. Sono ipotesi che chiaramente sovrastimano il consumo energetico, ma introdotte per facilitare la lettura dell'indicatore. In un caso applicativo la formula potrà essere raffinata. Inoltre potrebbero potenzialmente controbilanciare il fatto che non sia possibile monitorare sovra consumi energetici che si hanno in particolari tipi di guasto, (come si vedrà in seguito attraverso l'indicatore 5.14)

Dalla 5.10 si intuisce come tipi di pezzi "i" del part mix che richiedono un dispendio energetico maggiore (un  $P_{processing\ i} \times T_{processing\ i}$  più alto rispetto agli altri) impattino maggiormente sul valore dell'indicatore complessivo: di conseguenza l'effort deve essere indirizzato a ridurre gli scarti di questo tipo di pezzi.

Per semplicità si considera in questa trattazione la presenza di un processo per il quale si ha una "condizione binaria" in uscita di pezzo buono oppure pezzo scartato. Per cui si indicherà come Quantità totale ( $Q_{tot\ i}$ ) prodotta per ciascun pezzo "i":

$$Q_{tot\ i} = Q_{good\ i} + Q_{rs\ i} + Q_{r\ i} \quad (5.11)$$

Posto dalla 5.10 che:

$$E1 = \sum_{i=1}^n (P_{processing\ i} \times T_{processing\ i} \times Q_{tot\ i})$$

(con l'ipotesi di aver escluso la quantità rilavorata), ci si propone di costruire un indicatore *Energy in Saturation* ( $E_{sat}$ ):

$$Energy\ in\ Saturation\ (E_{sat}) = \frac{Net\ production\ Energy}{Gross\ Production\ Energy} = \frac{E1}{E2} \quad (5.12)$$

L'insaturazione della risorsa, come valutato dal corrispettivo indicatore di performance time-based, è dovuta ad una serie di eventi che rallentano la produzione della risorsa (nel suo tempo disponibile), quali le fermate minori e i setup. Per tale ragione nel calcolo dell'indicatore energetico verranno considerate le micro fermate, le regolazioni e i setup.

$$E_{sat} = \frac{E1}{E1 + P_{idle}(T_{micro}) + P_{maint}(TTRp) + \sum_{i=1}^n Q_{tot\ i} Nct_i (P_{setup} \times T_{su})} \quad (5.13)$$

Più il valore dell'indicatore si avvicina ad al valore "1", maggiore è la sua saturazione e minore è il dispendio energetico ad esso relativo, ovvero minore è stato l'impatto del dispendio energetico di micro fermate, set-up e regolazioni.

Dal momento che quantificare il tempo speso in micro fermate imputate alla macchina  $T_{micro}$  non è possibile per via puntuale, è possibile ad ogni modo ricavarlo qualora si possa quantificare, ad esempio tramite stima, il tempo speso complessivamente speso in fermate e regolazioni (ovvero  $\sum_{i=1}^n Q_{tot\ i} Nct_i T_{su} + TTRp + T_{micro}$ ), e da esso sottrarre i primi due termini della somma.

Inoltre, facoltativamente, è possibile anche valutare l'impatto di ogni singolo stato manifatturiero sul consumo energetico  $E2 - E1$  apportando il consumo energetico dello stato, ad esempio  $\sum_{i=1}^n Q_{tot\ i} Nct_i (P_{setup} \times T_{su})$  sul consumo energetico  $E2 - E1 = P_{idle}(T_{micro}) + P_{maint}(TTRp) + \sum_{i=1}^n Q_{tot\ i} Nct_i (P_{setup} \times T_{su})$ . Tuttavia, come si vedrà nella sezione di 5.7.2 implementazione della metodologia, un approccio senz'altro più utile e omnicomprensivo atto a valutare il contributo dei singoli consumi energetici è senz'altro l'utilizzo di un diagramma di pareto. In questo modo si può valutare quali consumi apprestino "il 20% delle cause" responsabili dell' "80% del consumo energetico"<sup>60</sup>. L'utilizzo del diagramma di pareto riserva delle limitazioni, che verranno analizzate nel paragrafo 5.7.2.

Si può facilmente intuire come il processo di costruzione degli Energy KPI attraverso l'Energy Diagram abbia natura ricorsiva, fino a quando non si arriva alla condizione finale di ottenere un Energy KPI che abbia come denominatore il consumo energetico totale nel periodo (E6).

L'indicatore *Energy in Availability* ( $E_{avail.}$ ), valuta invece una valorizzazione energetica dei guasti e delle manutenzioni in tempo richiesto. Esso è illustrato in 5.14 e 5.15:

<sup>60</sup> Si tratta ad ogni modo di percentuali variabili.

$$Energy\ in\ Availability\ (E_{avail.}) = \frac{Gross\ Production\ Energy}{Net\ Usage\ Energy} = \frac{E2}{E3} \quad (5.14)$$

Posto dalla 5.13 che:

$$E2 = E1 + P_{idle}(T_{micro}) + P_{maint}(TTRp) + \sum_{i=1}^n Q_{tot\ i} Nct_i T_{su}, \text{ si ha:}$$

$$(E_{avail.}) = \frac{E2}{E2 + P_{maint}T_{maint} + P_{ramp\ up}T_{ramp\ up}N_{spf} + P_{idle}T_{down}} \quad (5.15)$$

In particolare, si vede come impattano sull'indicatore 5.14 sia gli stati di intervento di riparazione dei guasti, valorizzati con  $P_{maint}$ , sia il numero di riavvii che in alcuni casi si possono avere a seguito di particolari guasti totali, e sia gli stati di idle che si hanno nel momento in cui una macchina affetta da guasto continua ad essere accesa in attesa di intervento. Un punto debole di questo indicatore risiede nel fatto che non è possibile valorizzare l'energia di lavorazione nel caso di guasto (è stato detto precedentemente che alcune situazioni di guasto possono portare ad un sovra consumo da parte della macchina), dal momento che un PLC di macchina non "riconoscerebbe" questo tipo di situazione. Un vantaggio dell'indicatore  $E_{avail.}$  è che esso comporta una disponibilità di dati puntuali per il suo calcolo

Questo indicatore palesa più di tutti la differenza di una visione time-based rispetto a quella energy-based: se il tempo di riavvio di una macchina utensile per guasto risulta trascurabile in termini di un suo inserimento nell'indicatore di disponibilità, allora ciò non vale da un punto di vista energetico, dato che la potenza in ramp up è un power requirement inferiore a quello richiesto ad esempio dalle lavorazioni, ma decisamente non trascurabile. L'effort sarà dunque rivolto ad evitare questo tipo di guasti totali, e in generale, ad evitare l'occorrenza di tutti gli stati manifatturieri il cui consumo energetico è più elevato.

Si analizza ora l'indicatore  $E_{usage}$ , che valuta l'impatto di cause a livello di sistema complessivo e non strettamente a livello macchina.

$$E_{usage} = \frac{Net\ Usage\ Energy}{Energy\ in\ operating\ time} = \frac{E3}{E5} \quad (5.16)$$

Posto dalla 5.15 che:  $E3 = E2 + P_{maint}T_{maint} + P_{ramp\ up}T_{ramp\ up}N_{spf} + P_{idle}T_{down}$  si ha:

$$E_{usage} = \frac{E3}{E3 + P_{idle}(T_{bsps} + T_{wtm} + T_{bssf} + T_{wtbr} + T_{ws}) + P_{processing}T_{ts} + P_{standby}(T_{mo} + T_{mm})} \quad (5.17)$$

L'inutilizzo della risorsa è determinato da cause inerenti la gestione del sistema produttivo (blocking & starvation), gestione degli utensili, processamento di pezzi per test e campionature e problemi di natura esterna come la mancanza ordini e mancanza materiali.

Si suppone, per semplicità, che i blocking e gli starvation comportino soli *idle* energetici (consapevoli del fatto che macchine più avanzate possono convertirsi in stand-by superata una soglia temporale).

Dalla 5.17 si nota come esistano molteplici cause che determinano gli idle di macchina, tradizionalmente riconosciuti come maggiori responsabili del suo consumo energetico complessivo rispetto alla lavorazione dei pezzi vera e propria (si veda Gutowski, Dahmus, & Thiriez, 2006). Prove, test e campionature, seppur comportando normalmente tempi relativamente piccoli rispetto agli altri due contributi della quantità  $E5 - E3$ , possono causare un dispendio energetico alto, dal momento che la potenza di lavorazione  $P_{processing}$  è la più alta potenza assorbita dalla macchina rispetto alle altre. Anche in questo caso è possibile calcolare l'impatto dei singoli contributi dell'"inefficienza di utilizzo" (ad esempio  $P_{standby}(MO + MM)$ ) sul totale di  $E5 - E3$ , rapportando le due quantità.

Infine, è possibile calcolare un indicatore  $E_{opening}$  che valuti l'impatto degli avviamenti della macchina. Coerentemente con l'Energy Diagram in Figura 5.12, esso è calcolato relativamente all'energia consumata nel tempo T. Esso è illustrato in 5.18 e 5.19;

$$E_{opening} = \frac{\text{Energy in Opening Time}}{\text{Energy in Solar Time}} = \frac{E5}{E6} \quad (5.18)$$

Posto dalla 5.17 che  $E5 = E3 + P_{idle}(T_{bsps} + T_{wttm} + T_{bssf} + T_{wtbr} + T_{ws}) + P_{processing}T_{ts} + P_{standby}(MO + MM)$  si ha:

$$E_{opening} = \frac{E5}{E5 + P_{rampup}T_{rampup}(N_{sph} + N_{st})} \quad (5.19)$$

Gli avvii della macchina sono distinti in avvii dovuti ai "post-festività" ( $N_{sph}$ ), e avvii dovuti al modo in cui normalmente viene gestita la turnazione dello stabilimento ( $N_{st}$ ). Uno dei motivi per cui è stata fatta tale suddivisione risiede nel fatto che il numero di avvii stabiliti dalla turnazione dello stabilimento rientra all'interno di valutazioni tecnico economiche riguardanti i costi di produzione, all'interno del quale esiste il costo dell'energia (basti pensare a come varia il costo dell'energia in funzione della fascia oraria).  $N_{sph}$  è dunque una variabile suscettibile di modifiche in funzione di decisioni prese dalla funzione di produzione (essa infatti appartiene al cluster di *Production Management*). L'indicatore  $E_{opening}$  non è presente all'interno della prospettiva time-based di sviluppo degli indicatori di efficienza (diagramma dello stato di impianto in



allegato 9), ma rientra necessariamente all'interno di valutazioni di tipo energetico dal momento che l'energia necessaria per l'avviamento della macchina utensile  $P_{rampup}T_{rampup}$  non può essere trascurata, a differenza del solo tempo di avvio.

Infine, è possibile "comporre" il *Lean Energy Indicator* attraverso il contributo dei singoli indicatori illustrati quali:  $E_{opening}, E_{usage}, E_{avail}, E_{sat}, E_{quality}$  attraverso la 5.19:

$$Lean\ Energy\ Indicator = E_{opening} \times E_{usage} \times E_{avail} \times E_{sat} \times E_{quality} = \frac{E_0}{E_6} \quad (5.20)$$

In conclusione, il *Lean Energy Indicator* valuta quanta energia a valore aggiunto (di lavorazione) è utilizzata per la produzione di output vendibile, in relazione al consumo energetico totale sostenuto. Quest'ultimo può essere analizzato e interpretato attraverso una scomposizione del *Lean Energy Indicator* in fattori quali  $E_{opening}, E_{usage}, E_{avail}, E_{sat}, E_{quality}$ .

La rappresentazione che la 5.20 fornisce, costituisce un ottimo supporto all'interpretazione delle cause dietro le quali il consumo energetico sostenuto per la produzione dell'output produttivo non sia tutto a valore aggiunto (ovvero energia di processamento dei pezzi) ma sia costituito inoltre da una serie di sprechi, supportando l'identificazione delle cause di inefficienza e il miglioramento congiunto delle performance time-based e performance energy-based. L'utilizzo degli Energy KPI generati verrà trattato nel dettaglio in sezione 5.7: *Step 6- Energy KPI System Design & Implementation*.

### 5.5.2: Caso 2: Energy KPI sviluppati

La Figura 5.13 rappresenta l'Energy Diagram utilizzato per il caso 2 *OEE-based*. Il consumo energetico complessivo del periodo è scomponibile secondo l'approccio *time-based* di Seiichi Nakajima (1988) adottato per lo studio delle cause di riduzione dell'efficienza di macchine e soprattutto impianti.

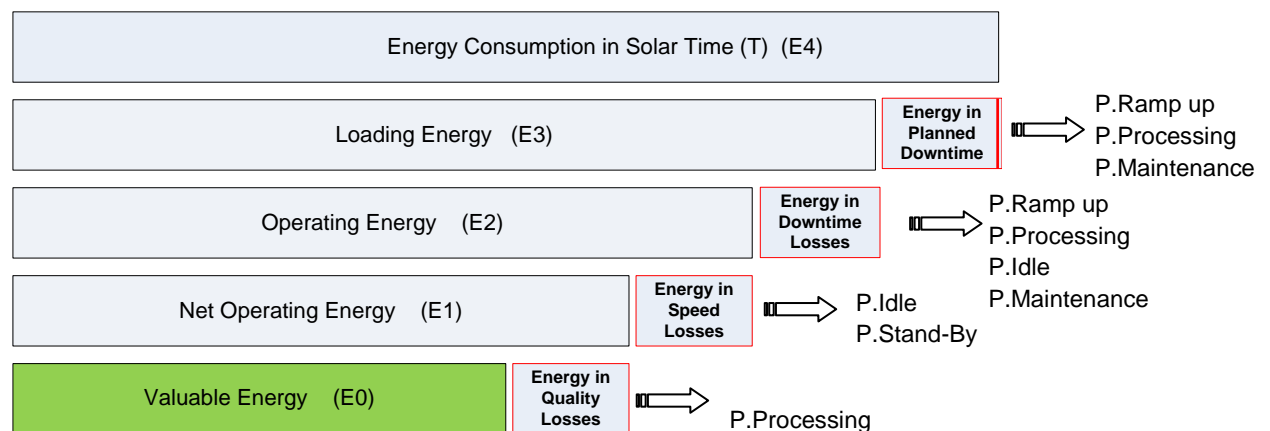


Figura 5.13: Energy Diagram caso 2.

Si ricorda che il calcolo degli indicatori attraverso questo approccio presuppone, come per il caso 1, la conoscenza del consumo energetico tramite monitoraggio/stima in T o a consuntivo.

Si riporta la simbologia delle grandezze utilizzate per il calcolo degli indicatori, parte delle quali è stata precedentemente illustrata in Tabella 5.5: *Descrizione degli stati manifatturieri per il caso 2*. e parte dei quali precedentemente illustrata nella simbologia adottata per il caso 1 (in tal caso, le ipotesi fatte sulle grandezze considerate rimangono le stesse, a meno di ulteriori notifiche).

$Q_r$ : quantità realizzata nel periodo<sup>61</sup>

$Q_{dp}$ : defects in process (scartati in produzione), una parte della  $Q_r$  .

$Q_{sr}$ : startup rejected (scartati in avviamento), una parte della  $Q_r$  .

$Q_{good}$ : produzione buona, una parte della  $Q_r$

$P_{processing}$ : potenza in processing

$T_{processing}$ : tempo di lavorazione

Ideal CT: tempo di ciclo ideale dell'impianto

Ideal Throughput: Throughput ideale dell'impianto

$T_{idle}$ : Tempo nel periodo T all'interno del quale l'impianto è stato in idling

$T_{stand-by}$ : Tempo nel periodo T all'interno del quale l'impianto è stato in idling

$T_{reducedspeed}$  tempo nel quale l'impianto ha lavorato a velocità ridotta (inteso come  $T_{idle} + T_{stand-by}$  )

$Q_t$ : quantità teorica producibile al ritmo (o tempo di ciclo) ideale

$T_{su}$ : tempo di set up unitario

$N_{ct}$ : numero di cambi utensile nel periodo

$P_{setup}$ : potenza in setup

$TTR_p$ : Tempo di riparazione degli interventi preventivi

$P_{rampup}$ : potenza in avviamento

$T_{rampup}$ : tempo per l'avviamento della macchina.

$N_{spf}$ : Numero di avvi *post failure*

$N_{st}$ : Numero di avvi secondo turnazione

$N_{sph}$ : Numero di avvi *post holidays*

$P_{maint}$ : potenza in maintenance

$P_{idle}$ : potenza in idle

$P_{standby}$ : potenza in stanby

$T_{down}$ : inteso come Tempo di Ritardo Gestionale + Tempo Diagnosi + Tempo Ritardo Logistico negli interventi di manutenzione correttiva

$T_{maint}$ : inteso come *Tecnico di Riparazione + Tempo di Rimessa in servizio* negli interventi di manutenzione correttiva

$T_a$ : tempo in adjustments (regolazioni).

La trattazione non si sofferma in maniera puntuale sull'illustrazione di ogni Energy KPI, giacché il principio di generazione dei KPI nonché le grandezze

<sup>61</sup> Dal momento che l'OEE utilizza -oltre che misure in grandezze temporali- misure in grandezze di quantità (quantità teorica vs quantità realizzata ) per "spiegare" i rallentamenti in produzione , si ritiene opportuno illustrare una situazione monoprodotto. Le quantità produttive non saranno indicizzate. Questa assunzione non va ad inficiare in modo particolare la validità degli indicatori giacché i setup (ovvero i cambi utensile effettuati per la realizzazione del pezzo) sono ad ogni modo considerati.

coinvolte al loro interno sono state già “assimilate” nel paragrafo precedente 5.5.1.

E' facile supporre come sia possibile, anche in questo caso, generare l'indicatore di *Lean Energy Indicator*, che valuta quanta energia “a valore aggiunto” (ovvero l'energia utilizzata per la produzione di pezzi “buoni”), è stata impiegata in relazione al consumo energetico totale, secondo la 5.21:

$$\text{Lean Energy Indicator} = \frac{\text{Valuable Energy}}{\text{Energy Consumption in } T} = \frac{E0}{E4} \quad (5.21)$$

L'indicatore *Lean Energy Indicator* può essere ottenuto attraverso la composizione di quattro contributi percentuali realizzati dagli Energy KPI 5.22, 5.23, 5.24, 5.25.

$$\text{Energy in Quality Losses } (E_{ql}) = \frac{\text{Valuable Energy}}{\text{Net Operating Energy}} = \frac{E0}{E1} \quad (5.22)$$

$E_{ql}$  valorizza, attraverso il suo complemento ad 1, l'energia persa per problemi di qualità.

$$\text{Energy in Speed Losses } (E_{sl}) = \frac{\text{Net Operating Energy}}{\text{Operating Energy}} = \frac{E1}{E2} \quad (5.23)$$

Allo stesso modo  $E_{ql}$  valorizza l'energia persa per rallentamenti del ritmo produttivo, dovuti a molteplici cause, rispetto ad un ritmo standard.

$$\text{Energy in Downtime Losses } (E_{dl}) = \frac{\text{Operating Energy}}{\text{Loading Energy}} = \frac{E2}{E3} \quad (5.24)$$

$E_{dl}$  valorizza l'energia persa per i downtime losses, che Nakajima associa a guasti, regolazioni e set up.

$$\text{Energy in Planned Downtime Losses } (E_{pdl}) = \frac{\text{Loading Energy}}{\text{Energy Consumption in } T} = \frac{E3}{E4} \quad (5.25)$$

$E_{pdl}$  valorizza l'energia persa per i planned downtime losses, ovvero tutte le perdite pianificate, dove una serie di operazioni (ad esempio la manutenzione preventiva) sono condotte in tempo non richiesto.

Così facendo si ottiene:

$$\text{Lean Energy Indicator} = E_{pdl} \times E_{dl} \times E_{sl} \times E_{ql} \quad (5.26)$$

Si sviluppano in maniera puntuale i singoli Energy KPI 5.22, 5.23, 5.24, 5.25.

$E_{ql}$  è espressa in questo secondo caso, visto le ipotesi poste, come:

$$E_{ql} = \frac{P_{processing} \times T_{processing} \times Q_{good}}{P_{processing} \times T_{processing} \times Q_r} \quad (5.27)$$

Ne consegue che  $E1 = P_{processing} \times T_{processing} \times Q_r$ , dunque:

$$E_{sl} = \frac{E1}{E1 + T_{idle}P_{idle} + T_{standby}P_{standby}} \quad (5.28)$$

Ne consegue che  $E2 = E1 + T_{idle}P_{idle} + T_{standby}P_{standby}$ , dunque:

$$E_{dl} = \frac{E2}{E2 + P_{setup}N_{ct}T_{su} + (T_{maint} + T_a)P_{maint} + T_{down}P_{idle} + N_{spf}P_{rampup}T_{rampup}} \quad (5.29)$$

Ne consegue che  $E3 = E2 + P_{setup}N_{ct}T_{su} + (T_{maint} + T_a)P_{maint} + T_{down}P_{idle} + N_{spf}P_{rampup}T_{rampup}$ , dunque:

$$E_{pdl} = \frac{E3}{E3 + TTR_p P_{maint} + (N_{sph} + N_{st})P_{rampup}T_{rampup}} \quad (5.30)$$

La spiegazione dettagliata dei singoli indicatori è ritenuta ridondante, dal momento che la natura e il significato delle grandezze coinvolte nei singoli Energy KPI è derivabile sia dall'Energy Diagram e la Cross View relativi al caso 2. L'unica annotazione doverosa è relativa all'indicatore  $E_{sl}$  (5.29). Si ricorda infatti che, al fine di "allinearsi" alla visione OEE-based, le perdite per i rallentamenti in produzione (ovvero velocità ridotte rispetto a quelle target) sono calcolate in termini di differenza tra una quantità  $Q_t^{62}$  teoricamente producibile al ritmo standard nel tempo al netto dei guasti e una quantità  $Q_r$  effettivamente realizzata, ovvero:

$$T_{reducedspeed} = (Q_t - Q_r) \times \text{Ideal CT} \quad (5.31)$$

oppure:

<sup>62</sup> Si ricorda che  $Q_t = \text{Operating time} \times \text{Ideal Throughput}$ , oppure  $Q_t = \text{Operating time} / \text{Ideal CT}$

$$T_{reducespeed} = \frac{(Q_t - Q_r)}{Ideal\ Throughput} \quad (5.32)$$

Nelle ipotesi è stato posto che:

$$T_{reducespeed} = T_{idle} + T_{standby} \quad (5.33)$$

Dove  $T_{idle}$  e  $T_{standby}$  contengono in pratica una serie di stati manifatturieri (si veda tabella) quali blocking e starvation, mancanza utensili, mancanza ordini e materiali, ecc. che rallentano il flusso produttivo in condizioni ideali. Si ipotizza che parte di  $T_{reducespeed}$  (ovvero  $T_{idle}$ ) sia valorizzato energeticamente attraverso uno stato energetico di idle, mentre un'altra parte ( $T_{standby}$ ) possa essere valorizzato in stand-by, qualora la macchina sia predisposta di un comando che la converta in stand-by superata una certa soglia temporale. Qualora così non fosse, si avrebbe un valore di  $T_{standby}$  pari a 0.

Sono stati dunque sviluppati Energy KPI la cui struttura e approccio sono del tutto identiche a quelle del caso 1, con la sola differenza che considerando un numero minore di stati manifatturieri, si perde una parte del contributo che i KPI sono in grado di apportare al decision making. Nella sezione 5.6 a pag. 179 si discuteranno a tal proposito le differenze qualitative tra lo sviluppo degli Energy KPI effettuato nel caso 1 e lo sviluppo degli Energy KPI effettuato nel caso 2, evidenziando la presenza di chiari trade-off.

Dal momento che l'Energy Diagram per il caso 2 è "ispirato" alla struttura di calcolo dell'Overall Equipment *Effectiveness*, si potrebbe provare a rielaborare questo indicatore in chiave energetica.

Nel caso time-based sono disponibili due visioni equivalenti dell'OEE: la 5.34 valuta l'OEE in termini di *pezzi* realmente prodotti e senza difetti rispetto a pezzi teoricamente ottenibili lavorando all' *Ideal Throughput*, mentre la 5.35 valuta l'OEE in relazione al *tempo* teoricamente impiegato nel realizzare la produzione effettiva di pezzi buoni sul tempo totale non schedulato.

$$OEE = \frac{Q_{good}}{Loading\ Time \times Ideal\ Throughput} \quad (5.34)$$

$$OEE = \frac{Q_{good} \times Ideal\ CT}{Loading\ Time} \quad (5.35)$$

Un indicatore di efficacia quale l'OEE necessita di un valore standard (o ideale) in relazione al quale valutare la performance di efficacia, così come per l'OEE è l' *Ideal Throughput* 5.34 o l' *Ideal CT* nella 5.35. Nel caso energetico, la misura

corrispettiva del tempo di ciclo è rappresentata dall'indicatore di Specific Energy Consumption (SEC), così come illustrato nella revisione bibliografica in 2.20.

$$SEC = \frac{\text{Final energy consumption}}{\text{Amount of product or intermediate}} = \left[ \frac{J}{\text{unit}} \right] \quad (5.36)$$

dal momento che, anziché il tempo, viene rapportata l'energia impiegata per la realizzazione di un pezzo. Di conseguenza, essendo il SEC il reciproco dell'indicatore Energy Efficiency (EE), si ha che la misura corrispettiva, in ottica energetica, del *throughput* di produzione, è l'EE, definita come (si veda 2.19 in revisione bibliografica):

$$EE = \frac{\text{Useful output of a process}}{\text{Energy input into a process}} = \left[ \frac{\text{units}}{J} \right] \quad (5.37)$$

Di conseguenza, il valore standard (o ideale) da utilizzare per la costruzione di un indicatore di efficacia energetica è costituito dal minor consumo energetico per pezzo (*Ideal SEC*), oppure, alternativamente, dal maggior numero di prodotti a parità di energia (*Ideal EE*). Per motivi legati ad una maggiore intuitività, si sceglie di utilizzare come valore target un *Ideal SEC*, un consumo energetico unitario ideale, ottenibile in assenza di qualsiasi perdita, così definito:

$$Ideal SEC = \frac{\text{Ideal energy consumption for amount of product}}{\text{Amount of product}} \left[ \frac{J}{\text{unit}} \right] \quad (5.38)$$

Si può dunque stabilire la definizione di indicatore di efficacia energetica per questa trattazione: Un indicatore di *efficacia energetica* esprime il consumo energetico complessivamente impiegato per la realizzazione di prodotti buoni  $Q_{good}$  nel periodo T in relazione al consumo energetico che si sarebbe impiegato per la realizzazione di una stessa quantità in condizioni ideali o standard.

Il consumo energetico effettivamente impiegato per la realizzazione della quantità  $Q_{good}$  è proprio il consumo energetico nel tempo solare T, ovvero *Energy Consumption in T* (E4<sup>63</sup> in figura 5.13), qualora si vogliano considerare tutti i tipi di perdite, mentre se si decide di non considerare le perdite in tempo schedulato il consumo energetico effettivamente impiegato diventa il *Loading Energy* (E3 in figura 5.13).

L'energia che si sarebbe impiegata per realizzare la stessa quantità  $Q_{good}$  in condizioni ideali è  $Q_{good} \times Ideal SEC$ .

---

<sup>63</sup> in ottica di efficacia, l'energia complessivamente impiegata per la realizzazione di  $Q_{good}$  è il consumo energetico del periodo. Non deve in nessun modo essere inteso come E0, l'energia a valore aggiunto.

E' chiaro che il consumo energetico effettivamente impiegato per la realizzazione della quantità è una quantità maggiore del consumo energetico in condizioni ideali, e di conseguenza quest'ultimo costituirà il numeratore dell'indicatore. Più vicino il *Loading Energy* o l' *Energy Consumption in T* sarà rispetto a  $Q_{good} \times Ideal SEC$  e più l'efficacia aumenta tendendo idealmente al valore 1. Gli indicatori 5.39 e 5.40 sono indicatori di *efficacia energetica*: il primo è un Overall Equipment Energy Effectiveness (OEEE), il secondo Total Effective Energy Equipment Performance (TEEEP):

$$OEEE = \frac{Q_{good} \times Ideal SEC}{Loading Energy} \quad (5.39)$$

$$TEEEP = \frac{Q_{good} \times Ideal SEC}{Energy consumption in T} \quad (5.40)$$

Si sviluppa nel dettaglio la costruzione del 5.39, l'OEEE, come:

$$OEEE = E_{dl} \times E_p \times Q \quad (5.41)$$

Ovvero:

$$OEEE = \frac{Operating Energy}{Loading Energy} \times \frac{Theoretical consumption for Q_r}{Operating Energy} \times \frac{Q_{good}}{Q_r} \quad (5.42)$$

Dove il *Theoretical consumption for Q<sub>r</sub>* è espresso, secondo quanto illustrato precedentemente, da  $Q_r \times Ideal SEC$ , per cui si ha:

$$OEEE = \frac{Operating Energy}{Loading Energy} \times \frac{Q_r \times Ideal SEC}{Operating Energy} \times \frac{Q_{good}}{Q_r} \quad (5.43)$$

La formula di calcolo dell' *Operating Energy* e di  $E_{dl}$  è stata precedentemente illustrata in 5.28 e 5.29.

L'approccio attraverso cui l' *Ideal SEC* può essere calcolato dipende dallo standard che la singola azienda vuole fissarsi.

Se si proponesse di considerare come *Ideal SEC*, dal momento che si opera in condizione ideali in cui non esistono perdite legati a guasti, set up, rallentamenti e problemi di qualità, la sola energia  $P_{processing} \times T_{processing}$  di lavorazione del pezzo, si avrebbe:

$$OEEE = \frac{Q_{good} \times P_{processing} \times T_{processing}}{Loading Energy} \quad (5.44)$$

$$TEEEP = \frac{Q_{good} \times P_{processing} \times T_{processing}}{\text{Energy consumption in } T} = \text{Lean Energy Indicator} \quad (5.45)$$

La formulazione del *TEEEP* coinciderebbe con quella del *Lean Energy Indicator*. In effetti, il *Lean Energy Indicator* può essere considerato un indicatore orientato all'efficacia, dal momento che esso valuta il consumo energetico in relazione ad un target ideale che è la sola energia di lavorazione dei pezzi.

Volendo fissare un target, seppur irraggiungibile, ma più sensato, si può porre:

$$\text{Ideal SEC} = (P_{processing}T_{processing}) + (P_{setup}N_{ct}T_{su}) \quad (5.46)$$

dal momento che l'esecuzione dei cambi utensili è necessaria per poter lavorare il pezzo e fare in modo che acquisisca determinate feature. Questo *Ideal SEC* rende non più verificata la relazione *TEEEP = Lean Energy Indicator*. Inoltre, esso può essere arricchito con una percentuale di consumo di energia in idle ottenibile dalla letteratura o sulla base di stime che derivano dall'analisi dei dati dei MES e SCADA.

## 5.6: Confronto qualitativo tra il caso productivity-based e caso OEE-based

La Tabella 5.6 riassume i punti chiave dei due casi *Productivity-based* e *OEE-based*. Le differenze esistenti tra i due casi condizionano la generazione degli stati manifatturieri (time view), le relazioni di causa-effetto tra stati manifatturieri ed energetici (cross view) e la generazione degli Energy KPI. Sono stati formulati appositi criteri per la valutazione dei due casi. L'obiettivo primario della tabella è mettere in luce i trade-off esistenti in termini di potenzialità e delle limitazioni di ciascun caso.

Tabella 5.6: Confronto tra il caso productivity-based e caso OEE-based

Criteri di valutazione	Caso 1: Productivity-based	Caso 2: OEE-based
	<b>Time View</b>	<b>Time View</b>
Livello di dettaglio degli stati manifatturieri	Alto	Basso
Processo di individuazione degli stati manifatturieri	Può essere complesso e necessitare di brainstorming tra attori differenti	Semplice. Stati manifatturieri implicitamente definiti dall'OEE
Variabili di II livello associate a ciascuno stato manifatturiero	Poche e ben circoscritte	Molte: si perde parte della comprensione delle relazioni di causa-effetto



		tra gestione del sistema produttivo e consumo energetico
	<b>Cross View</b>	<b>Cross View</b>
Collegamento tra Time View ed Energy View	Può essere complessa e necessitare di brainstorming tra attori differenti all'interno dello stabilimento	Semplice
	<b>Energy KPI</b>	<b>Energy KPI</b>
Mole di dati necessaria per il calcolo degli indicatori: Informatizzazione della fabbrica	Alta: esigenze di elevata integrazione e granularità dei dati	Modesta o Bassa
Contributo informativo apportato al management	Alto	Medio

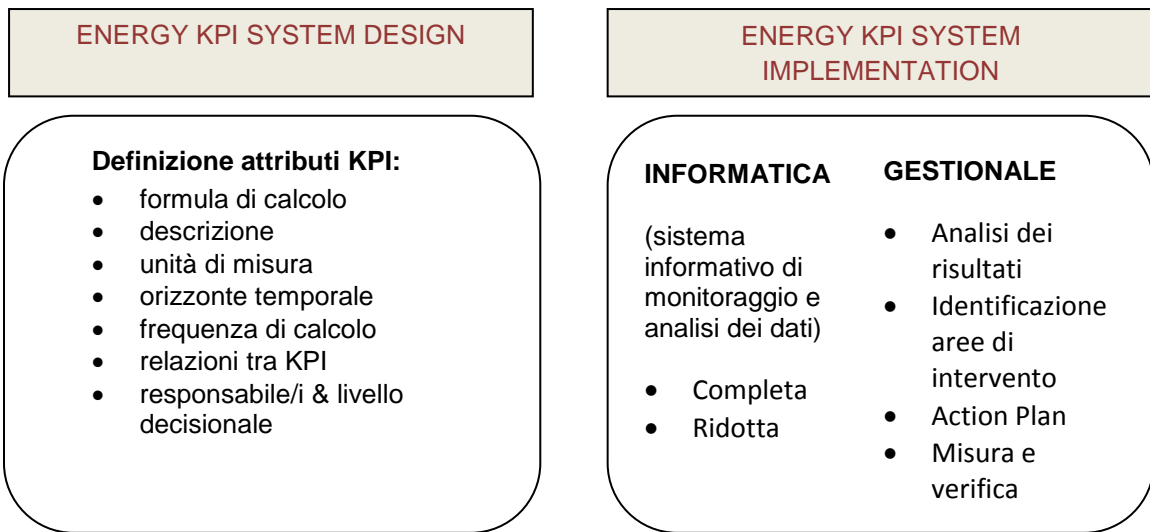
Il confronto qualitativo permette di selezionare il caso migliore in relazione ad applicazioni future della metodologia da parte dell'industry del Manufacturing. Assieme al supporto fornito dalla tabella, occorre a tal proposito considerare lo stato dell'arte degli strumenti, competenze, e tecnologie possedute dalle aziende manifatturiere per la selezione del caso migliore da proporre in sede di applicazione. In virtù dei trade-off che la tabella 5.6 suggerisce, si potrebbe proporre un'applicazione della metodologia cross view sviluppata secondo il caso 2: *OEE-based*. Oltretutto, l'OEE è un indicatore ampiamente utilizzato da parte delle aziende manifatturiere, e conseguentemente l'inserimento di una versione energetica dell'OEE risulterebbe più *soft* e facilmente comprensibile.

### 5.7: Step 6- Energy KPI System Design & Implementation

A questo punto si entra nella seconda macrofase della metodologia, la fase di implementazione (si veda figura 5.1). Come è stato visto nello step 3 della progettazione e implementazione di un PMS (*la gestione attraverso la misurazione*

a pag. 108, di Bourne, Mills, Wilcox, Neely, & Platts, 2000), una volta progettati, i KPI devono essere gestiti all'interno dell'ambiente produttivo e gestionale, revisionati e mantenuti.

I box sottostanti illustrano i significati di *Design* e *Implementation* del sistema di indicatori progettato, rispettivamente spiegati in dettaglio nei paragrafi 5.7.1 e 5.7.2 rispettivamente.



### 5.7.1: Energy KPI System Design

Come è stato visto nel paragrafo 2.1.2: *Key Performance Indicator*, ciascun indicatore sviluppato deve necessariamente essere dettagliato attraverso un *record sheet* che lo definisca in tutti quegli attributi necessari ad una chiara visualizzazione e gestione del KPI all'interno dell'organizzazione. La modalità di realizzazione di un buon *record sheet* è stata trattata a pag. 27: tra gli attributi riportati si elencano quelli che rivestono un ruolo fondamentale per la specificazione del KPI:

- formula di calcolo
- descrizione
- unità di misura
- orizzonte temporale di riferimento
- frequenza di calcolo
- relazioni di collegamento tra indicatori diversi.
- responsabile/i del valore del KPI, livello decisionale di riferimento

La RO5, si propone di fornire dettagliate guideline di utilizzo dei KPI progettati, dal momento che esse non sono spesso definite in maniera dettagliata (o non definite affatto), in programmi di energy management attraverso KPI, come ha evidenziato la gap analysis. Si immagina di dover implementare il sistema di KPI progettato all'interno di un programma di energy management o un singolo energy program focalizzato su determinate macchine/reparti, ecc. In primis occorrerà "caricare" gli Energy KPI sviluppati all'interno di un record sheet di visualizzazione offerto dal SI d'azienda, compilando gli attributi sopra elencati.

I primi tre attributi sono stati esaustivamente definiti nel corso del capitolo 5, dal momento che:

- le formule di calcolo sono state esplicate riportando il significato delle singole grandezze che compongono gli indicatori;
- il significato “gestionale” di ciascun indicatore è stato ben definito;
- gli Energy KPI sono tutti adimensionali: più il valore dell'indicatore tende al valore “1”, migliore è la performance energetica. E' assicurata dunque una facile lettura del valore target dell'indicatore e del grado di efficienza del sistema.

Un valido orizzonte temporale di riferimento per il calcolo di questi indicatori potrebbe essere il mese: si ipotizza sia il minimo intervallo in grado di contenere un ampio set di variabili di consumo energetico, sui quali ha senso effettuare un'analisi.

Per quanto riguarda la frequenza di calcolo, essa dipende chiaramente dalla qualità del sistema di monitoraggio e dalle esigenze di controllo del management. Dal momento che, allo stato attuale, i sistemi di monitoraggio energetico in continuo da parte di un ampio insieme di aziende costituiscono un trend di medio-lungo periodo (come verrà messo in evidenza nel capitolo 7: *Conclusioni e Sviluppi Futuri*), ha senso parlare di frequenza di calcolo solo in relazione ad iniziative specifiche di misurazione da parte del management, che potrà essere effettuata di conseguenza solo a consuntivo, attraverso fogli elettronici e stime delle grandezze eventualmente mancanti o software più evoluti di MES e SCADA che conoscano lo stato complessivo dell'impianto secondo una certa frequenza di rilevazione. Nel paragrafo 5.7.2 verrà esplicitato in dettaglio l'implementazione vera e propria del sistema di indicatori dal punto di vista del SI.

In questo caso le relazioni tra gli indicatori sviluppati sono di facile rappresentazione, visto che gli Energy KPI sviluppati sono relazionati tra loro in quanto fattori di composizione di indicatori più aggregati, quali l'*OEEE* o il *Lean Energy Indicator*. Le relazioni sussistenti tra i diversi indicatori saranno rappresentati dal SI attraverso la possibilità di eseguire operazioni di *drill down* degli stessi.

Nella sezione 5.3: *Step 3 -Time/Manufacturing View: definizione delle variabili di consumo energetico* (stati manifatturieri) è stata dedicata particolare cura all'identificazione puntuale delle cause di inefficienza all'interno dello stabilimento produttivo che hanno effetti diretti sul consumo energetico. Le variabili di consumo energetico individuate sono state raggruppate in cluster di responsabilità aziendale quali *External Causes*, *Production Management*, *Maintenance*, *Quality* e *Worker*.

La definizione dei cluster non è soltanto funzionale alla rappresentazione delle relazioni di causa-effetto all'interno del diagramma di Ishikawa (i cluster rappresentavano le *categorie di causa* all'interno del diagramma), ma è

soprattutto funzionale alla definizione delle figure di stakeholder ai quali associare gli Energy KPI sviluppati. L'obiettivo è quello di attribuire i KPI ad uno o più stakeholder che siano, seppur con qualche dovuta approssimazione, "responsabili" del valore ottenuto a consuntivo dall'indicatore.

Il caso che più consente, come evidenziato in sezione 5.3, una comprensione più puntuale delle relazioni di causa effetto, e che consente di generare Energy KPI più dettagliati è il caso 1. Il valore del *Lean Energy Indicator* risultava spiegato attraverso il contributo dei fattori  $E_{opening}, E_{usage}, E_{avail}, E_{sat}, E_{quality}$ . Nel caso 2, dato il minor numero di stati manifatturieri, sono stati generati un numero minore di KPI, all'interno del quale si "aggregano" ragionevolmente molteplici cause di consumo energetico. Nel caso 2 gli Energy KPI che compongono il *Lean Energy Indicator* sono  $E_{pdl}, E_{dl}, E_{sl}, E_{ql}$ . Inoltre, nel caso 2, sono stati sviluppati gli indicatori *OEEE* e *TEEEP*.

Si illustra ora una possibile attribuzione delle figure responsabili dei valori di tali Energy KPI:

- gli indicatori  $E_{quality}$  e  $E_{ql}$ <sup>64</sup> sono attribuibili al responsabile e all'ingegneria della qualità (*Quality*), senza dimenticare la presenza di un naturale tasso fisiologico di scarto dettato ad esempio dall'età della macchina;
- l'indicatore  $E_{sat}$  è inficiato per la maggior parte dalla presenza di set-up, vista l'energia spesa per i cambi utensile in relazione all'energia cumulata dalle micro fermate a livello macchina.  $E_{sat}$  è dunque un indicatore associato alla programmazione della produzione (*Production Management*), in particolare, alla figura responsabile della programmazione dei sequenziamenti e delle ottimizzazioni dei cambi utensili, considerando come "limite" la realizzazione di un certo mix produttivo che necessariamente richiede un numero di cambi utensili, potenzialmente ottimizzabile;
- l'indicatore  $E_{avail}$  è attribuibile al responsabile manutenzione, all'ingegneria di manutenzione, alle squadre di intervento (*Maintenance*) Occorre oltretutto formare in maniera adeguata gli operatori (*Worker*) al riconoscimento tempestivo dei guasti, ma dal momento che l'operazione di formazione deve essere curata da parte della funzione manutenzione, si può ritenere che  $E_{avail}$  sia per buona parte attribuibile al *Maintenance*;

---

<sup>64</sup> Gli indicatori *Quality* e *Eq* sono del tutto equivalenti. Essi sono stati formulati con un nome diverso per rendere visibile l'appartenenza a due casi diversi (rispettivamente caso 1 e caso 2).

- $E_{usage}$  ed  $E_{sl}$  sono indicatori che mettono in luce tutti i rallentamenti del ritmo produttivo in termini di gestione della produzione (loading, operations sequencing, ecc.) e gestione degli utensili: si tratta dunque del cluster di *Production Management*. E' tuttavia presente l'incidenza di rallentamenti dovuti a stakeholder esterni (*External Causes*), ad esempio clienti (clienti per cause di mancanza ordini e fornitori per cause di mancanza materiali). E' quindi auspicabile una maggior integrazione e comunicazione tra stakeholder esterni e interni per ridurre l'incidenza di questi KPI, spesso i maggiori responsabili delle inefficienze energetiche;
- $E_{pdl}$ , se in tempo non richiesto si considerano i soli interventi in preventiva, può anch'esso essere attribuibile al *Maintenance*;
- gli indicatori *OEEE*, *Lean Energy Indicator* e *TEEEP*, essendo indicatori aggregati, più "macro" rispetto agli altri, possono essere visualizzati in corrispondenza di un livello decisionale più alto rispetto ai livelli decisionali in cui sono stati collocati gli altri indicatori più "disaggregati". Ad esempio, gli indicatori *OEEE* e *TEEEP* potrebbero essere visualizzati dai direttori degli stabilimenti dell'impresa e dagli energy manager, e potenzialmente utilizzabili in qualità di benchmark. La condizione di applicabilità di tali indicatori in qualità di benchmark dipende strettamente dalla tipologia di mix produttivo e macchine utilizzate: non avrebbe senso confrontare gli *OEEE* di aziende che lavorano un mix produttivo diverso (che richiede ad esempio un numero significativamente maggiore di cambi utensili), o che utilizzano macchine diverse in termini di power requirement, dal momento che i consumi energetici risulterebbero notevolmente diversi anche a parità di performance. E' necessario dunque, ai fini dell'applicabilità di benchmark, che queste condizioni operative siano *ceteris paribus*.

### 5.7.2: Energy KPI System Implementation

Una volta progettato il sistema di KPI, esso deve essere gestito per il *purpose* per il quale è stato creato, ovvero abilitare il continuous improvement delle performance energy-related (RO3). In questo paragrafo si illustra come l'implementazione di un sistema di Energy KPI, così come l'implementazione di qualsiasi sistema di KPI orientato al miglioramento continuo, possa essere studiato sotto due prospettive:

- la prima prospettiva guarda l'implementazione dal punto di vista dell'infrastruttura informativa dell'azienda;
- la seconda prospettiva, di maggior interesse nel caso in questione, guarda l'implementazione del sistema dei KPI dal punto di vista gestionale.

Dal punto di vista informativo, l'implementazione esprime fundamentalmente il processo e le modalità di approvvigionamento dei dati necessari al calcolo degli indicatori. Secondo il punto di vista dell'infrastruttura informativa, l'implementazione della metodologia può avvenire in due modalità:

1. Implementazione completa
2. Implementazione ridotta.

La modalità di implementazione informativa modifica la natura e la bontà delle azioni che il sistema di Energy KPI è in grado di fornire per supportare il decision making.

#### 1. Implementazione completa

La letteratura inerente il monitoraggio energetico afferma come il principio basilare che consenta una completa ottimizzazione delle performance energetiche risponda ad un monitoraggio continuo dei flussi energetici.

L'intera metodologia è proposta in relazione a questa situazione, e in relazione ad uno scenario di medio-lungo periodo acclamato dalla letteratura e dalle esigenze delle industry.

Il caso di "implementazione completa" prevede l'esistenza as-is in azienda di un sistema di monitoraggio dei consumi energetici, e –come conseguenza di quanto precedentemente affermato- questa situazione corrisponde ad un risultato ottimale che la metodologia è in grado di apportare in termini di supporto al decision making. I sensori a livello macchina, linea o impianto consentono di disporre di un'alta qualità e accuratezza dei dati, che potranno essere forniti in tempo reale o discreto, in funzione del livello di automazione/informatizzazione complessivo della fabbrica. In questo tipo di situazione, il consumo energetico consuntivo verrebbe automaticamente costruito e scomponibile attraverso gli Energy KPI, note naturalmente le informazioni di base sul comportamento del sistema manifatturiero (tempi di guasto, tempi di set up, tempo mancanza ordini, ecc.) La disponibilità da parte dell'azienda di questo tipo di informazioni viene data in questa trattazione per assodato, oltretutto, esiste un notevole *effort* nel mondo della ricerca collaborativa volto ad integrare informazioni relative a performance di diverso tipo all'interno degli stabilimenti produttivi e delle supply chain.

Una versione più "soft" dell'implementazione completa potrebbe essere quella che vede il sistema di monitoraggio correntemente usato dallo stabilimento in relazione alle performance manifatturiere ragionevolmente raffinato attraverso l'inserimento degli *energy state* ( $P_{\text{processing}}$ ,  $P_{\text{idle}}$ , ecc) e delle modalità attraverso cui associare ciascuno di essi agli stati manifatturieri che MES, SCADA, ERP e CMMS (Computerized Maintenance Management System) di azienda monitorano. Ad esempio, in relazione ad un'applicazione dell'*OEEE*, esistono in

commercio una serie di software (*OEE Cockpit*<sup>65</sup>, *FactoryTalk Metrics*<sup>66</sup>, *Objective.MES*<sup>67</sup>, ecc.). Un upgrade di tale software consentirebbe di bypassare il monitoraggio continuo dei consumi energetici, posto ovviamente di conoscere a consuntivo il consumo energetico complessivo della risorsa monitorata in un periodo T. E' un tipo di implementazione associabile a monitoraggio energetico effettuato in discreto oppure in maniera saltuaria. Naturalmente questo approccio, seppur facilmente applicabile in caso di piattaforme software evolute, non assicurerebbe informazioni totalmente accurate, dal momento che possono esistere –ad esempio–molteplici comportamenti di guasto con molteplici conseguenze energetiche. Ragion per cui la modellizzazione del comportamento energetico della macchina dovrebbe essere ragionevolmente semplificata in questa situazione.

## 2. Implementazione ridotta

Dal momento che, nel caso di alcune aziende non automatizzate o scarsamente automatizzate, calcoli dei valori dei KPI possono essere eseguiti manualmente attraverso fogli di calcolo (basti pensare all'OEE, anch'esso eseguito manualmente in suddette situazioni), è possibile applicare la metodologia in uso ridotto attraverso dati di consumo energetico (nel periodo stabilito dall'orizzonte temporale fissato) ottenuti da una campagna di misurazione o da stime ragionevoli. E' chiaro che in un caso di questo tipo la frequenza di misurazione risulterebbe più bassa rispetto al caso dell'implementazione completa, e le informazioni ottenute dagli Energy KPI sarebbero inficiate da una più scarsa qualità dei dati. Anche in questa situazione si può pensare un'implementazione soft come quella delineata precedentemente, nella quale i software di monitoraggio e analisi dei dati delle performance del manufacturing possono essere raffinati attraverso l'aggiunta degli stati energetici e delle relazioni di causa effetto tra stati energetici e stati manifatturieri.

E' molto importante sottolineare che l'inserimento di un'implementazione ridotta e il suo confronto con l'implementazione completa all'interno dell'*Energy KPI System Implementation* è stato effettuato esclusivamente in virtù di una possibile argomentazione circa l'orizzonte temporale di implementazione della metodologia. Se si volesse applicare la metodologia nel breve periodo si potrebbe valutare un'implementazione di tipo ridotto, mentre nel medio e nel lungo periodo, sulla base delle *industry need* e dei trend delineati nella sezione 2.3 e 2.4 in *Revisione Bibliografica*, si immagina un'applicazione della metodologia nella sua modalità ottimale.

---

<sup>65</sup> Van Lente & De Vos

<sup>66</sup> Rockwell Automation

<sup>67</sup> De Clercq Solutions

Dal punto di vista gestionale, l'implementazione consiste nella gestione del sistema di KPI in riferimento al *purpose* per il quale è stato creato, ovvero abilitare il continuous improvement delle performance energy-related (RO3). In riferimento a quanto delineato per la progettazione e gestione dei PMS, (*la gestione attraverso la* misurazione a pag. 108) Bourne, Mills, Wilcox, Neely, & Platts (2000) affermano come sia molto utile stabilire una metodologia di analisi delle performance e di assegnazione delle priorità alle azioni. Normalmente gli step tradizionalmente eseguiti in questo contesto prevede, dopo il monitoraggio e la misura delle performance attraverso i KPI:

- l'analisi dei valori forniti dai KPI;
- una loro corretta interpretazione e comunicazioni alle parti interessate;
- l'identificazione delle aree di miglioramento potenziale;
- il setting degli obiettivi e delle azioni di miglioramento;
- la verifica dei risultati attraverso una nuova misura e analisi dei valori forniti dai KPI dopo un certo orizzonte temporale.

Si procede dunque a illustrare in che modo il sistema strutturato di progettazione e utilizzo degli Energy KPI si qualifica come decision support tool per gli energy manager e in generale per il management coinvolto all'interno dei programmi di EE (RO5).

Dal momento che il criterio di progettazione degli Energy KPI è proprio quello di abilitare il decision making, la prima analisi dei valori forniti dai KPI, nonché l'identificazione delle aree di miglioramento potenziale, è insita all'interno del modo con il quale gli Energy KPI sono stati progettati (date le RO3, RO4, e RO5). Gli Energy KPI sono dunque di facile lettura in termini di identificazione del grado di soddisfazione (e insoddisfazione) della performance energetica e identificazione delle aree di intervento e delle figure responsabili: più il valore del KPI è lontano dal valore ideale pari a 1, maggiore è l'esigenza di intervento all'interno dell'area definita dal cluster associato all'indicatore.

In riferimento agli Energy KPI sviluppati per il caso 1, ad esempio, un basso valore di  $E_{avail}$  in relazione agli altri indicatori di  $E_{opening}$ ,  $E_{usage}$ ,  $E_{sat}$ ,  $E_{quality}$  che compongono il *Lean Energy Indicator* suggerisce una necessità di intervento all'interno dell'ingegneria di manutenzione e/o nella funzione di manutenzione, un valore troppo basso di  $E_{quality}$  suggerisce un forte impatto dei problemi di qualità all'interno dei consumi energetici (sulla base del processo di attribuzione KPI-figure responsabili eseguito nel paragrafo precedente).



Immaginando di considerare come esempio  $E_{avail}$ , i consumi energetici imputati ad un basso valore dell'indicatore sono rappresentati dagli alti valori della somma  $P_{maint}T_{maint} + P_{ramp\ up}T_{ramp\ up}N_{spf} + P_{idle}T_{down}$ , al denominatore dell'indicatore (si veda 5.13). Ci si potrebbe chiedere in che misura è possibile agire sui consumi energetici che gli Energy KPI individuano come "responsabili" del peggioramento della performance.

A tal proposito deve essere sempre fatta una contestualizzazione della natura dei consumi energetici che compongono i KPI individuati, *idealmente* riassumibile attraverso la matrice dei consumi energetici in Figura 5.14.

La matrice è composta da due dimensioni:

1. la dimensione orizzontale rappresenta l'entità del singolo consumo energetico, ovvero l'entità del singolo power requirement (energia in ogni istante di tempo, ad esempio  $P_{ramp\ up}$ );
2. la dimensione verticale rappresenta il tempo in cui il singolo power requirement è stato assorbito nel tempo T di monitoraggio (in riferimento all'esempio,  $T_{ramp\ up}N_{spf}$ ).

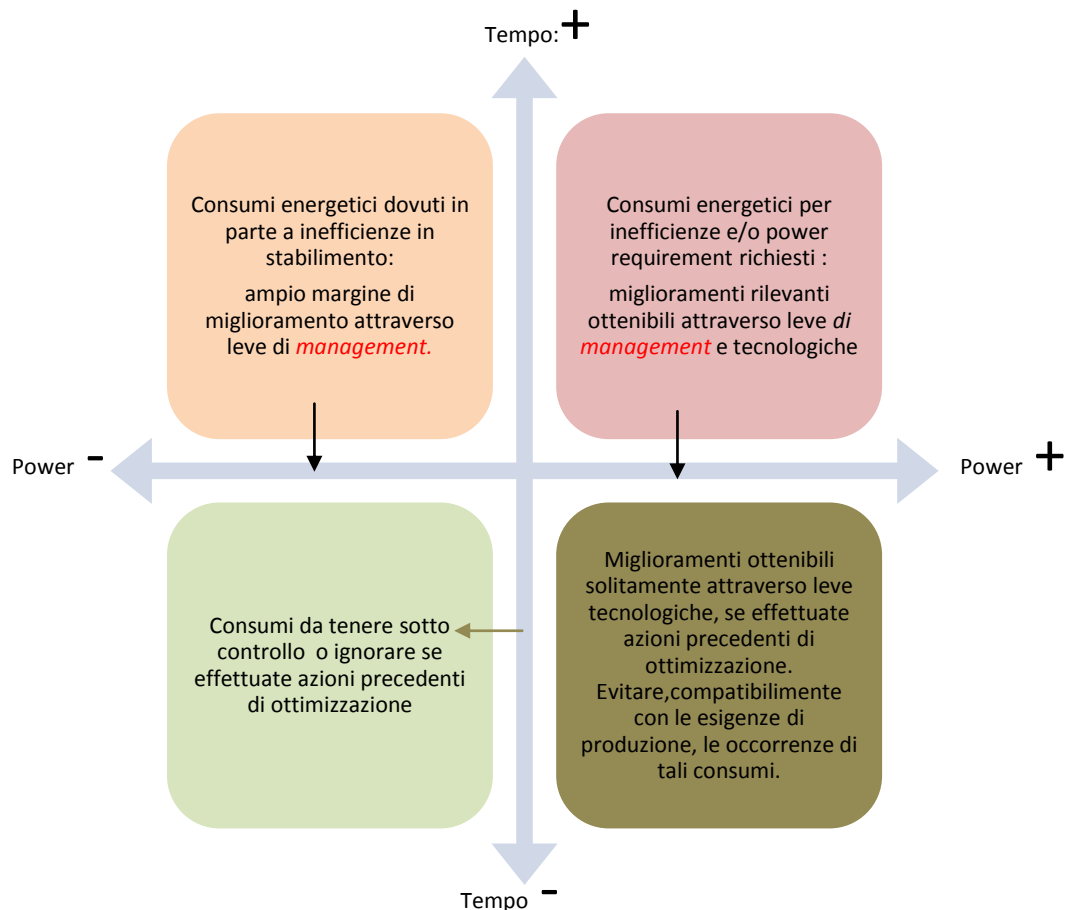


Figura 5.14: Matrice dei consumi energetici.

La natura dei consumi energetici indica la/e leva/e attraverso cui ridurne l'entità. In figura 5.14 sono rappresentate le direzioni (attraverso le frecce) di miglioramento in corrispondenza di ciascuna area. Dal momento il focus è sull'energy management, le leve di miglioramento sono orientate a rendere l'occorrenza dei consumi più ridotta, laddove possibile. Miglioramenti tecnologici (ad esempio acquistare macchine che spendano meno energia per unità di tempo) sono considerate *out of scope*, (freccia grigia) dal momento che si tratta di leve quasi sempre a più alto costo rispetto a leve di management.

Una delle aree di attenzione è quella relativa al primo quadrante: elevati tempi e elevate potenze. Per quanto riguarda il quarto quadrante, fermo restando che tempi alti possono essere dovuti anche a fattori che non implicano direttamente inefficienze, esso è comunque un'area all'interno della quale vale la pena investigare per valutare se effettivamente è avvenuta un'occorrenza elevata di un certo stato manifatturiero (esempio: i tempi di riparazione e rimessa in servizio  $T_{maint}$  sono stati più alti rispetto allo standard?). Tale informazione è reperibile dai comuni sistemi MES, SCADA e ERP.

Nel caso di rilevazioni di inefficienze, alti consumi energetici di questo tipo possono facilmente essere abbattuti attraverso leve di management, il cui costo può essere ad ogni modo discusso con altri attori dello stabilimento.

Nell'esempio in esame si valuta dove i consumi che compongono la somma  $P_{maint}T_{maint} + P_{ramp\ up}T_{ramp\ up}N_{spf} + P_{idle}T_{down}$  vanno a collocarsi all'interno della matrice di consumo energetico. La collocazione dipende dai valori puntuali che assume ciascun tempo e ciascuna potenza. Ad ogni modo è bene cogliere qualsiasi opportunità di riduzione dei consumi energetici attraverso leve di management, ragionevolmente applicabili nell'esempio in esame, dal momento che l'alto consumo può essere dovuto rispettivamente ad alti tempi di riparazione dei guasti –durante i quali la macchina è in stato energetico di manutenzione-, alto numero di riavvii *post-failures* e tempo delle macchine in stato di guasto precedente alla riparazione –durante la quale è stato ipotizzato uno stato energetico di idle.

E' stato dunque identificato il problema “macro” attraverso l'Energy KPI a più basso valore, contestualizzati i consumi energetici ad esso imputati e valutata la possibilità e l'area di intervento: bisogna stabilire *in che modo* intervenire, al fine di fissare correttamente gli obiettivi e il piano di azione di miglioramento nell'area individuata.

Anche in questo caso la metodologia fornisce un supporto efficace, dal momento che sono state esaustivamente formalizzate le *variabili di II livello* dai quali ciascuno stato manifatturiero dipende. Si ricorda che le variabili di II livello sono state definite come “manopole”, qualitative o quantitative, sulle quali si può agire

attraverso un appropriato *management* del sistema produttivo al fine di ridurre l'intervallo temporale dello stato manifatturiero associato.

Alcune delle variabili di II livello associate all'esempio (e riportate esaustivamente in Tabella 5.3 per il caso 1) sono illustrate in Tabella 5.6, all'interno della quale viene riportato il relativo stato manifatturiero, secondo quanto illustrato all'interno della time view per il caso 1.

Tabella 5.7: Esempio variabili di II livello relativo all'esempio di riduzione del valore di  $E_{avail}$ .

Manufact. State	[t]	Variabile II Livello
Corrective Maintenance: Total/Partial Failures in Down	$T_{ramp\ up} N_{spf}$ $T_{down}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• qualità dei piani di manutenzione preventiva</li> <li>• training manodopera: tempestività degli operatori nel riconoscere e segnalare i guasti</li> <li>• training manutentori: tempestività della squadra di manutenzione a giungere sul posto</li> </ul>
Corrective Maintenance: Total/Partial Failures in Maintenance	$T_{maint}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• training manutentori: tempestività di riparazione della squadra di manutenzione</li> </ul>

Appurata la possibilità di agire su determinati consumi e su come agire, possono dunque essere fissati degli obiettivi a livello di management atti a contenere l'entità temporale di questi stati manifatturieri. Sulla base della natura delle variabili di II livello per il caso in analisi, il contributo negativo dell'indicatore  $E_{avail}$  potrebbe essere contenuto attraverso un piano di azione così strutturato:

- una riconsiderazione della frequenza degli intervalli in preventiva da parte dell'ingegneria di manutenzione;
- l'adozione di un programma di training di manutenzione destinato agli operatori, per il riconoscimento tempestivo dei guasti;
- l'adozione di un programma di training destinato alla squadra di manutenzione.

Gli obiettivi formulati sono scomposti in task e il piano d'azione viene rilasciato. Sulla base dell'entità del programma formulato si stabilisce un orizzonte temporale entro il quale ci si aspetta che l'indicatore  $E_{avail}$  fornisca una performance migliore, più vicina al valore 1 del periodo corrente.

Naturalmente, per il modo in cui gli Energy KPI sono stati strutturati attraverso l'Energy Diagram, il valore di ciascun KPI dipende esclusivamente dal set ristretto di variabili ai quali l'indicatore è riferito, e non dipende in alcun modo da

un aumento della domanda di prodotto o da altri fattori, che sono ragionevolmente attribuiti in maniera distinta ad altri Energy KPI.

Ogni programma di miglioramento ha un costo, ragion per cui ci si domanda: quanti Energy KPI, le cui performance si sono rivelate insoddisfacenti, possono essere considerati all'interno di un programma di miglioramento delle performance? Ad esempio, consideriamo la sola analisi dell' indicatore a più basso valore (compreso ovviamente tra 0 e 1), o i primi due indicatori a più basso valore, tra quelli che compongono il *Lean Energy Indicator*?

A tal proposito un'analisi di pareto applicata ai singoli consumi energetici che compongono gli Energy KPI può rivelarsi estremamente utile, al fine di ottimizzare energie e costi. Ciononostante, dal momento che il diagramma di pareto compara singole cause (Energy KPI o singoli consumi energetici) sul consumo totale del periodo, è molto importante sottolineare che tale strumento debba essere utilizzato *solo per analisi relative al periodo corrente*, e non utilizzato per valutare un aumento o una diminuzione di singoli contributi nel tempo.

Infine, ci si può domandare che tipo di miglioramento ci si può aspettare da una metodologia che abilita il continuous improvement attraverso le modalità appena esplicate. Come riportato in figura 3.1 del *Research Framework*, la metodologia cross view abilita due tipi di miglioramento:

- un miglioramento *diretto* sulle performance energy-related strettamente relative al consumo energetico, ad esempio KPI termodinamici (consumo energetico totale dello stabilimento) o fisico-termodinamici (SEC), ecc;
- un miglioramento anch'esso *indiretto* sulle performance time-based, visto che le leve di management per migliorare l'EE sono leve che migliorano congiuntamente le performance time-based del sistema manifatturiero (la RQ della trattazione è infatti basata sull'integrazione tra time-view ed energy-view del sistema). Ciononostante, occorre tenere conto che i miglioramenti sono effettuati, per questo livello di analisi, in relazione alle problematiche di una sola risorsa, mentre invece occorre considerare la che somma di ottimi locali non è uguale a un ottimo globale (questa limitazione verrà trattata in capitolo 7, e proposta in chiave di sviluppo futuro);
- un miglioramento *indiretto* sulle performance energy-related che comprendono, oltre al consumo energetico, anche altre variabili: basti pensare ai KPI economico-fisici. Nonostante il miglioramento dei consumi energetici, alti prezzi dell'energia che controbilancino il miglioramento ottenuto rendono nullo l'effetto degli action plan proposti;

- un miglioramento *indiretto*, più globale, sul sustainable manufacturing.

## 5.8: Conclusioni e *finding* dalla metodologia Cross View

Si procede ora a illustrare una serie di punti chiave, annotazioni e finding riguardanti la metodologia proposta. Una buona parte di essi entra a far parte delle conclusioni delineate nel capitolo 7: *Conclusioni e Sviluppi Futuri*.

La metodologia sviluppata è proposta in relazione ai *research gap* individuati in Revisione Bibliografica. Essa si propone di apportare un contributo alle aziende del discrete Manufacturing colmando, parzialmente o totalmente, parte dei gap individuati in relazione al focus di ricerca. Dal momento che si tratta di un contributo ad un research topic incentrato su un trend di medio-lungo periodo, e orientato alla industry circoscritta, e dal momento che il contributo è apportato in termini di sviluppo di nuovi KPI a supporto dell'EEM, valutazioni tecnico-economiche di implementazione della metodologia sono considerate *out of scope*. La discussione dell'implementazione informativa effettuata in paragrafo 5.7.2 è effettuata al solo scopo di delineare una stima del possibile orizzonte temporale nel quale le aziende manifatturiere sarebbero in grado di utilizzare in maniera strutturata i KPI generati.

Nel corso dello sviluppo della metodologia sono emersi importanti finding. Questi ultimi sono il risultato di un'iniziale progettazione della metodologia, raffinata per interventi successivi attraverso le informazioni apportate non solo dalla letteratura, ma anche da attori esterni attraverso l'intervista semi strutturata, che verrà spiegata in dettaglio nel successivo capitolo 6. I finding individuati sono ora elencati e verranno triangolati con un caso di studio proposto anch'esso in capitolo 6. L'obiettivo del caso di studio è di supportare una parte dei finding emergenti e renderli più facilmente comprensibili attraverso esempi longitudinali, che mostrano ad esempio cambiamenti di alcune condizioni operative nel tempo.

I finding più importanti venuti alla luce nel corso della progettazione della metodologia sono:

1. il sistema di riferimento produttivo in cui una macchina lavora condiziona fortemente le sue performance energetiche. E' stato effettuato un tentativo di classificazione delle possibili caratteristiche dei sistemi di produzione industriale che impattano sulle performance energetiche, elaborate attraverso un *template* funzionale all'identificazione del sistema produttivo di riferimento;

2. esistono dei driver che determinano la bontà e l'appropriatezza di un utilizzo della metodologia da parte delle aziende manifatturiere;
3. sono state esplorate le variabili di consumo energetico, incluse in cluster di responsabilità aziendale, e collegate agli stati energetici della macchina. Maggiore è il numero di variabili di consumo energetico, maggiore è il numero di Energy KPI sviluppati e maggiore è il contributo informativo apportato al management e l'individuazione delle cause puntuali di consumo energetico. Per contro, in questa situazione, diventa maggiore anche la difficoltà di generazione degli Energy KPI e dell'approvvigionamento di dati;
4. è stata fornita una rappresentazione delle relazioni di causa effetto tra stati manifatturieri e consumo energetico attraverso il diagramma di Ishikawa. La presenza di un elevato numero di variabili di II livello (per definizione, leve di management) in qualità di *cause secondarie* relative agli stati manifatturieri conferma l'ampia possibilità di ridurre i consumi energetici agendo sulla gestione del sistema produttivo (ovvero su tali variabili) piuttosto che su leve tecnologiche;
5. la costruzione degli Energy KPI attraverso appropriati Energy Diagram consente ai valori restituiti dai KPI di non essere affetti da variazioni della domanda di mercato, fatta eccezione in corrispondenza di un cambiamento del mix produttivo, per il quale si avrebbe una minore o maggiore incidenza dei setup. Inoltre, tale costruzione consente che il KPI sia affetto dalle sole performance che esso è chiamato a valutare, evitando fenomeni di sovrapposizione;
6. non tutti gli alti consumi energetici sono uguali e potenzialmente "attaccabili" in termini di energy management: la matrice dei consumi energetici è costituita dalle dimensioni di tempo e potenza, e mostra le tipologie di consumo energetico su cui prestare maggiore attenzione, in relazione ad un'intenzione di migliorare le performance energetiche attraverso il management. L'area di consumo energetico più agevole da migliorare in termini di facilità e in termini di costo è quella costituita da alti tempi e basse potenze (box rosso in alto a sinistra in figura 5.14), dal momento che la sola leva di management riuscirebbe a ridurre significativamente i consumi energetici di quest'area riducendo/ottimizzando il consumo;
7. lo sviluppo degli Energy KPI ha evidenziato come esistano stati manifatturieri trascurabili da parte degli indicatori di performance time-based che hanno invece forti impatti sulle performance energy-based. Tali

stati sono idealmente collocati, all'interno della matrice dei consumi energetici, nella cella in basso a destra: l'esempio più rappresentativo è lo stato che corrisponde all'avvio della macchina (*starting*), sia per esigenze di turnazione, sia a causa di un guasto totale. L'occorrenza di tali stati deve essere evitata quanto più possibile (compatibilmente con le esigenze di produzione, ad esempio l'esigenza di accendere e spegnere le macchine per la normale produzione secondo calendario lavorativo): piccoli intervalli temporali presentano elevati impatti di consumo energetico;

8. le azioni di miglioramento di KPI energy-related che integrano relazioni di causa-effetto tra performance manifatturiere e performance energetiche hanno un impatto *diretto* sia su performance energetiche che performance manifatturiere. Gli effetti di un miglioramento/peggioramento delle performance time-based (esempio: *missing orders*) hanno un impatto tanto più amplificato all'interno degli Energy KPI quanto maggiore è l'entità del power requirement associato (nell'esempio in questione,  $P_{idle}$  o  $P_{standby}$ ).

## Capitolo 6 : VALIDAZIONE

Il capitolo 6 mostra in che modo è stata validata la metodologia proposta, tenendo presente l'impiego di una metodologia di ricerca che è quella del *Case Study Methodology*. Questo capitolo mostra in che modo i dati analizzati ed elaborati inizialmente attraverso l'osservazione, l'evidenza, la letteratura e i documenti ufficiali sono stati "triangolati" con fonti esterne. Nella *Case Study Methodology* le interviste giocano un ruolo centrale, che verrà analizzato nel dettaglio. Il capitolo è composto da due sezioni: 6.1:*Intervista semi strutturata*, e 6.2: *Il caso di una fresatrice CNC in una linea di Automotive*.

### 6.1: Intervista semi-strutturata

L'intervista ad esperti del settore assume per questa trattazione un ruolo di validazione qualitativa. Essa, apportando informazioni "esterne" rispetto a quelle ottenibili dalla letteratura, è in grado di:

- confermare o smentire delle ipotesi fatte nel corso della trattazione;
- chiarire alcuni punti riguardanti le esigenze dell'industry di riferimento per il quale risulta necessario un confronto esterno;
- confermare la rilevanza della metodologia per l'industry selezionata, i suoi driver di applicazione, i benefici, le barriere, ecc.;

L'intervista è dunque utilizzata per poter raffinare la metodologia inizialmente sviluppata attraverso il contributo delle informazioni ottenute, e apportare un feedback importante per la comprensione di come la metodologia progettata possa essere implementata in una realtà aziendale.

L'intervista è progettata attraverso domande ad ampio spettro, nel tentativo di coprire le principali aree di interesse per la trattazione. Il contributo più rilevante apportato dall'intervista è stato quello di raffinare:

- le *industry need* attuali in termini di analisi e miglioramento dei consumi energetici, e di conseguenza, la gap analysis;
- la formulazione iniziale di stati manifatturieri ed energetici;
- la formulazione iniziale delle associazioni di causa-effetto nello step di cross-view;
- gli sviluppi futuri prospettati in riguardo all'applicazione della metodologia.



Dal momento che l'intervista è stata rivolta a molteplici destinatari, il processo di raffinazione è stato effettuato ricorsivamente fino a quando non si è giunti alla condizione finale di validazione della metodologia.

L'intervista è stata rivolta a:

- studiosi esperti del settore del Manufacturing e della meccanica, in particolare delle macchine utensili;
- il responsabile di produzione di un'azienda internazionale<sup>68</sup> partner del Politecnico di Milano in alcuni progetti di ricerca;
- il responsabile di *Engine & Mechanical Machinery Operations* di Same Deutz-Fahr (Treviglio, BG).

La prima azienda selezionata per l'intervista è attiva da più di 160 anni, e conta circa 360000 dipendenti operanti in tutto il globo, occupando posizioni di mercato leader nei suoi sei settori di attività: *Industry, Energy, Healthcare, Infrastructure & Cities, Cross-Sector Business* e *Joint Ventures*. Per quanto riguarda l'*Industry*, essa abbraccia un range molto ampio di soluzioni tecnologiche di automazione, ad esempio i controlli di processo attraverso innovativi PLC, infrastrutture informative di MES, sensoristica, product lifecycle management software, ecc. Il focus sulla sostenibilità è molto forte all'interno delle pratiche aziendali, e il report di sostenibilità annuale ne rende atto, supportato da molteplici indicatori relativi ai tre aspetti della triple bottom line.

L'azienda Same Deutz-Fahr, fondata dai fratelli Cassani a Treviglio nel 1927, è uno dei principali produttori di macchine da raccolta, motori e macchine agricole al mondo. I marchi con i quali produce e distribuisce i suoi prodotti sono Same, Deutz-Fahr, Lamborghini, Hürlimann e Grégoire. Il sistema produttivo Same Deutz-Fahr si basa su quattro stabilimenti presenti in Europa (Italia, Germania, Francia e Croazia), uno in India, uno in Russia e uno in China. L'intervista è stata eseguita presso lo stabilimento di Treviglio (BG).

In particolare, il ruolo funzionale del contatto con Same Deutz-Fahr ricopre non solo la validazione qualitativa della metodologia tramite intervista (la cui struttura sarà esposta sotto) ma anche l'utilizzo delle caratteristiche del sistema produttivo dello stabilimento di Treviglio in qualità di caso d'uso per evidenziare parte dei finding relativi della metodologia esposti nel capitolo precedente.

L'intervista è articolata quattro sezioni, ciascuna delle quali contiene un gruppo di domande aperte: *Contesto aziendale, Scenario settoriale, Progettazione della metodologia, Implementazione della metodologia*. Esse sono descritte nell'elenco sottostante:

---

<sup>68</sup> Su richiesta dell'azienda, non è possibile citarne il nome per ragioni burocratiche e di riservatezza. Questa scelta ad ogni modo non impatta sulla bontà della validazione.

- La prima sezione –*Contesto aziendale*– è finalizzata ad appurare l’esistenza di un effettivo allineamento tra le informazioni ottenibili dall’azienda selezionata e le informazioni necessarie per poter effettuare la validazione. Si effettua dunque, attraverso una serie di domande, un check sulla compatibilità del profilo dell’azienda con il profilo di imprese verso i quali la metodologia può potenzialmente essere applicata. Inoltre, in virtù di questo check introduttivo, ci si assicura la qualità e la bontà delle informazioni ottenute dall’intervista e utilizzate per la validazione vera e propria attraverso le sezioni successive;
- Nella seconda sezione –*Scenario settoriale*– vengono proposte una serie di domande di natura investigativa sullo stato dell’arte del settore della produzione discreta in termini di EE, EM, KPI, ed altri topic trattati nel lavoro, al fine di acquisire informazioni “esterne” la letteratura non comprende o che può presentare in maniera diversa (informazioni non aggiornate, rivolte a Paesi/settori specifici, ecc.);
- La terza sezione –*Progettazione della metodologia*– ha come obiettivo quello di valutare la progettazione della metodologia in termini di scope considerato, esaustività degli elementi analizzati all’interno del livello di dettaglio in analisi, congruenza e continuità tra i passaggi logici e le fasi della metodologia;
- La quarta sezione –*Implementazione della metodologia*– è costituita da domande indirizzate alle possibili modalità e driver utilizzo effettivo della metodologia in una realtà aziendale.

Alla persona intervistata è stata preventivamente fornita una presentazione dell’elaborato contenente gli elementi principali della trattazione che una validazione qualitativa permette di rifinire. In questo modo la persona intervistata assimila con chiarezza il research topic e i passi logici della metodologia, e conseguentemente si garantisce una maggior qualità e accuratezza delle risposte fornite.

Le sezioni dell’intervista e le relative domande sono riportate in Appendice C a pag. 243.

## 6.2: Il caso di una fresatrice CNC nell’industry dell’automotive

In virtù dell’adozione della metodologia di ricerca del *case study methodology*, il caso in esame è un caso di natura teorica che servirà a supportare le teorie

emergenti (*finding* della sezione 5.8): non verrà infatti illustrato un calcolo puntuale di tutti gli Energy KPI sviluppati, dal momento che sarebbe fine a sé stesso e non porterebbe ad alcuna evidenza degna di nota, dal momento che gli Energy KPI sono pensati in quanto *tool* che si inseriscono in un ambiente produttivo complesso, nel quale energy manager utilizzano questi dati, stabiliscono un *action plan* sulla base delle indicazioni fornite da tali KPI, e valutano il successo del piano attraverso l'entità degli energy saving conseguiti.

Anche se si volesse eseguire un calcolo puntuale di tutti gli indicatori generati ci si scontrerebbe con il problema attuale di dati non sufficientemente granulari e di un monitoraggio energetico ancora fermo ad un livello fabbrica/capannone anziché a livello macchina, perlomeno se si guarda la realtà italiana nell'industry dell'automotive. Un caso *reale e completo* in un'azienda automotive, o in generale manifatturiera, può essere fatto solo in un orizzonte temporale nel quale i sistemi di monitoraggio energetico multilivello e la sensor technology permetteranno analisi energetiche diffuse in tutto l'impianto, fino al livello macchina.

Il caso in esame si limita dunque a mostrare un esempio della sola fase di progettazione della metodologia (si veda figura 5.1), e triangolare/confermare i *finding* individuati in sezione 5.8. Per la costruzione del caso è stato utilizzato un sistema di riferimento produttivo compatibile con quello dello stabilimento in azienda Same, ragionevolmente semplificato. Informazioni di questo tipo sono state ricavate attraverso una visita guidata, osservando gli impianti in funzione, e cogliendo i punti chiave delle dinamiche di gestione della produzione che impattano sui consumi energetici della macchina. I dati di macchina relativi ai power requirement e i dati temporali relativi al manufacturing system (stati manifatturieri), derivano invece dalla letteratura, dal momento che l'azienda Same non disponeva dei dati necessari alla costruzione del caso. Erano infatti sconosciuti i dati relativi ai power requirement dei centri di lavoro dei loro FMS, se non quello relativo alla potenza di lavorazione; e per quanto concerne i tempi morti relativi alle diverse inefficienze (stati manifatturieri), il management di Same utilizza alcune volte delle stime, ma si tratta di analisi non eseguite con la giusta attenzione, ragion per cui è stato deciso di considerare dati provenienti dalla letteratura dello studio degli impianti.

La risorsa produttiva di riferimento normalmente considerata dalla letteratura in analisi di tipo energetico a livello macchina utensile è costituita dalla macchina fresatrice CNC, una *milling machine*.

La fresatrice è una macchina utensile usata per la lavorazione in forme complesse di parti metalliche o di altri materiali, mentre la fresa è l'utensile di rotazione dotato di un numero definito di taglienti, i quali entrano in contatto in maniera sequenziale con il pezzo in lavorazione. L'operazione di fresatura consiste nell'asportazione di materiale (sotto forma di truciolo) attraverso un

movimento rotatorio dell'utensile fresa associato ad un movimento di avanzamento affidato al pezzo in lavoro o all'utensile stesso<sup>69</sup>. Il pregio principale delle fresatrici è di avere pochissimi limiti di forme realizzabili nelle lavorazioni e di poter svolgere con un solo programma di lavoro diverse operazioni complesse comprendenti forature, rettifiche, alesature, tagli, arrotondamenti. Inoltre, le fresatrici CNC sono dotate di sistemi automatici per la sostituzione degli utensili, in grado di rendere interamente automatizzato il cambio utensile (set-up). In letteratura i processi produttivi sono classicamente rappresentati attraverso un modello di input e output, dove la trasformazione degli input in output è effettuata dal processo produttivo stesso, rispondente ad un principio di conservazione dell'energia. Si utilizza dunque questo tipo di rappresentazione per poter illustrare la dinamica di trasformazione degli input in output per la *milling machine* di riferimento.

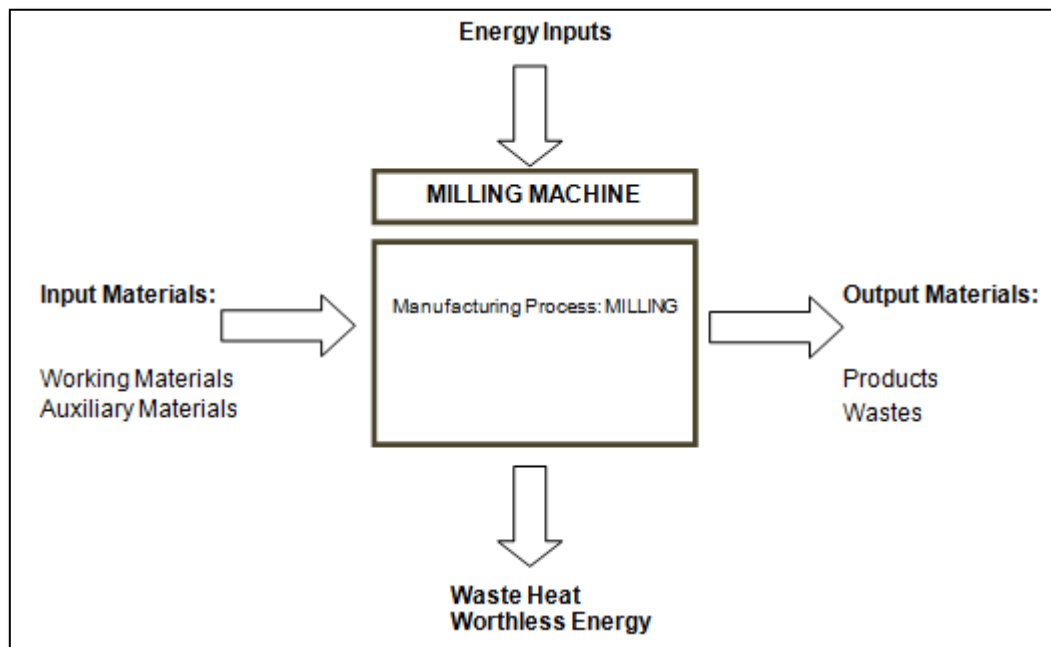


Figura 6.1: Flusso dei materiali e dei consumi elettrici in corrispondenza della fresatrice. Adattato da Gutowski, Dahmus, & Thiriez, 2006.

I materiali in input sono sia i *working materials*, cioè quelli che verranno sottoposti alla trasformazione operata dal processo produttivo (il grezzo o il WIP da lavorare), sia quelli ausiliari (olio, liquido refrigerante). Tra gli elementi in input al processo produttivo esistono non soltanto i materiali ma anche l'energia, sotto forma di elettricità, acqua, gas naturale, ecc. Solo parte di questa energia verrà trasformata in lavoro utile sul WIP/prodotto finito in uscita; la restante parte infatti entra a far parte di tutti quegli scarti quali emissioni, dispersione di calore e altri scarti di materiale. Gli Energy KPI valutano come e in che misura si

<sup>69</sup> Fonte:

[http://www.dormertools.com/sandvik/2531/Dutch/s004444.nsf/Alldocs/Product\\*2DMachiningSolutions\\*2DPDF\\*2ATH\\*2DPDFit/\\$file/8Fresatura.pdf](http://www.dormertools.com/sandvik/2531/Dutch/s004444.nsf/Alldocs/Product*2DMachiningSolutions*2DPDF*2ATH*2DPDFit/$file/8Fresatura.pdf)

concretizzano perdite di energia legate ad inefficienze di sistema produttivo. Si illustrano ora gli step principali di progettazione della metodologia applicati al caso in esame.

5.1: Step 1 -Definizione del sistema produttivo di riferimento

Nello step 1 della metodologia cross view è stata discussa l'esistenza di tre driver di applicazione: il livello di automazione dello stabilimento, il consumo energetico della macchina e il suo impatto ambientale (figura 5.2). Si ritiene che il caso in esame possa collocarsi in una posizione più che buona all'interno del "cubo" che descrive il volume di applicazione della metodologia: il processo di milling è un processo di produzione e non di assemblaggio, moderatamente energy-consuming. Lo stabilimento è collocato in prossimità del centro abitato e l'effort a contenere le emissioni è molto sentito. Inoltre il livello di automazione è medio-alto dal punto di vista delle stazioni operative, (le lavorazioni meccaniche sono eseguite da 3 FMS automatizzati) ma dal punto di vista dell'informatizzazione di stabilimento il livello è molto basso, e i dati di produzione sono elaborati attraverso fogli di calcolo e analisi rudimentali.

La tabella 6.1 mostra il collocamento del sistema produttivo del caso in esame nel *template* generato nel capitolo 5.

Tabella 6.1: Identificazione del sistema produttivo di riferimento nel caso in esame.

Discrete Manufacturing System (DMS)	Market Dimension			Management Dimension			Layout		
	S	R	MTS	U	B	C	JS	C	L
<b>MANUFACTURE</b>			X		X			X	
							→ Automation degree FMC FML ....hybrid solution...		
								X	
<b>ASSEMBLY</b>							F	C	L
							→ Automation degree Automatic Assembly Line, FAS, ....hybrid solutions...		

Same produce trattori su commissione, con un lead time ordine-ricezione di circa un mese. Se si analizza la dimensione del mercato dal punto di vista della risorsa produttiva, si può affermare come nel caso in esame ci si posizioni su una produzione in make to stock (MTS), dal momento che il reparto delle lavorazioni meccaniche produce su fabbisogno, secondo quanto stabilito dall'esplosione della distinta base dei trattori da produrre. L'impianto lavora su tre turni e si cerca

di tenere le macchine più occupate possibile. La produzione è a lotti (B), con un pallet di sei pezzi da lavorare, mentre il layout produttivo è annoverabile alla categoria delle celle di produzione (C): esistono 3 FMS “Mazak FA4008” che lavorano in parallelo, dunque in maniera indipendente. Il livello di automazione corrisponde ad un livello medio-alto. Ogni FMS è costituito da due centri di lavoro, gestiti da un operatore che si occupa del controllo di tutti i pezzi in uscita, del carico-scarico, e di piccoli settaggi degli utensili.

Step 2- Energy view: definizione degli stati energetici

A questo punto si definisce il comportamento energetico della *milling machine*. Il diagramma a stati in figura 6.2 è del tutto analogo al diagramma a stati generico riportato in figura 5.5, a meno della presenza dello stato energetico di stand-by, dal momento che la macchina utensile analizzata nel caso è una macchina “storicamente” studiata e applicata in diverse trattazioni e risalente al 1988, ragion per cui non possiede uno stato energetico recentemente introdotto in alcune macchine utensili finalizzato a maggiori energy saving.

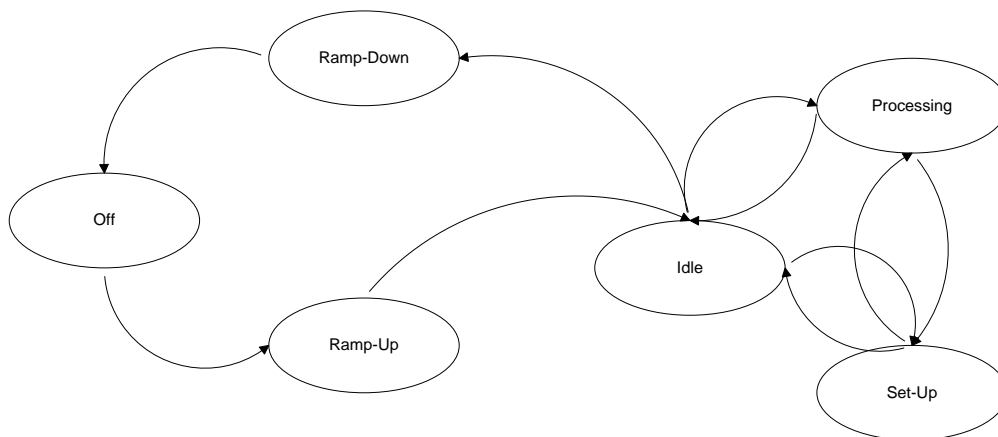


Figura 6.2: Diagramma a stati energetici per il caso in esame.

In tabella 6.2 sono stati definiti i power requirement e i tempi unitari, se presenti, riferiti agli stati energetici in scope nell’esempio. L’entità di tempi e potenze provengono da (Dahmus & Gutowski, 2004), (Dietmar & Verl, 2008) , Cannata (2011).

Tabella 6.2: Power requirement in fresatrice “Automated Milling Machine”. Fonte:

AUTOMATED MILLING MACHINE		
Energy State	Power [kW]	Tempi unitari [s]
$P_{Ramp\ up}$	2,5	20
$P_{Idle}$	1,2	-
$P_{Set\ up}$	3	-
$P_{Maint}$	0,6	-
$P_{Processing}$	5,8	70

### Step 3- Time view: definizione delle variabili di consumo energetico (stati manifatturieri)

La sezione 5.6, che tratta il confronto tra il caso productivity-based e il caso OEE-based, ha evidenziato come il secondo caso possa essere di più semplice applicazione, visto il minor numero di stati manifatturieri e conseguente la possibilità di disporre di informazioni meno granulate e più facilmente stimabili da parte delle aziende. Di conseguenza, la time view e la cross view applicate al caso sono del tutto analoghe a quelle presentate nei paragrafi 5.3.2 e 5.4.2, a meno, si ricorda, della presenza di stand.by, e per tale motivo non verranno riportate nel caso per non rendere la trattazione ridondante.

### Step 4- Calcolo degli Energy KPI e commento finale

La simbologia utilizzata fa riferimento alla simbologia illustrata per il caso 2.

Si riportano ora i dati di produzione relativi al caso. Si tratta di un caso monoprodotta, semplificato per fare in modo che siano messi in luce gli aspetti più importanti riguardanti l'interpretazione dei consumi con i quali gli Energy KPI sono realizzati, nonché le differenze esistenti con la prospettiva di calcolo degli indicatori time-based.

Si immagina una produzione mensile di 30 giorni lavorativi su tre turni (di conseguenza, a meno di guasti totali, non sono presenti avvii della macchina) con:

- $Q_r$ : quantità realizzata nel mese (al lordo degli scarti)<sup>70</sup> = 20538 pezzi
  - $Q_{good}$ : quantità realizzata nel mese (al netto degli scarti) = 20333 pezzi
- Si considera un tasso di scarto dell'1%, per cui:
- $Q_{sr} + Q_{dp} = 205$  pezzi
  - Ideal CT: tempo di ciclo ideale dell'impianto = 15 min/pezzo
  - $Q_t$ : quantità teorica producibile nel tempo operativo (ovvero tempo di funzionamento al netto di guasti e set up) al ritmo standard, cioè con una cadenza pari all' Ideal CT.
  - Si ipotizza un tempo complessivamente speso in cambi utensile nel mese (pari a  $T_{su} \cdot N_{ct}$ ) di 40 ore.
  - L'affidabilità della macchina è pari al 98%. In particolare, poiché dal punto di vista energetico occorre distinguere tra la situazione in cui la macchina è in attesa di essere riparata e la situazione in cui la macchina viene riparata, si suppone un downtime totale di guasto in correttiva  $DT_g$  composto in percentuale da un 30% di  $T_{down}$  (Tempo di Ritardo Gestionale + Tempo Diagnosi + Tempo

<sup>70</sup> Cifre indicativa e arbitraria in termini di valori assoluti. Il tasso di scarto è invece quello effettivamente presente in Same.

Ritardo Logistico) e un 70% di  $T_{\text{maint}}$ : Tecnico di Riparazione + Tempo di Rimessa in servizio)<sup>71</sup>.

- Si ipotizzano 3 riavii “post failures” dopo guasti totali.
- $T_{\text{reducedspeed}}$  tempo nel quale l’impianto ha lavorato a velocità ridotta. In questo caso esso coincide con  $T_{\text{idle}}$  dal momento che non sono previsti stand-by.

Si ricorda che il sistema produttivo di riferimento del caso rimane ad ogni modo il sistema produttivo di Same, seppur i loro centri di lavoro abbiano dati di potenza diversi da quelli riportati in tabella 6.2. Ad ogni modo il valore puntuale delle potenze non va ad inficiare sulla bontà delle conclusioni finali che si possono trarre analizzando il valore degli Energy KPI. Gli FMS in Same sono stand alone, lavorano componenti prodotti da una fonderia esterna in arrivo dal magazzino interno. Dopo le lavorazioni meccaniche, essi verranno assemblati in montaggio finale. Essendo una produzione in MTS, ci si aspetta un’alta saturazione delle macchine. I tempi morti, sulla base di quanto spiegato dal responsabile delle lavorazioni meccaniche, sono dovuti soltanto ad assenze di operatori che eseguono il carico/scarico dei pezzi, rotture degli utensili e prelievo/caricamento di utensili mancanti. In relazione agli stati manifatturieri identificati per il caso 2, a questi tempi morti vanno aggiunti i guasti delle macchine (ad esempio guasto ad una pompa), i cambi utensile (setup), e le lavorazioni difettose.

La tabella 6.3 illustra i consumi energetici coinvolti nel calcolo degli Energy KPI.

Tabella 6.3: Consumi energetici nel caso d’uso.

Stati manifatturieri [h]	Power [kW]	Consumi energetici [kWh]	Nome consumi energetici
$N_{\text{spf}} * T_{\text{rampup}} = 3 * 20 / 3600 = 0,0416$	$P_{\text{Ramp up}} = 2,5$	0,0416	Consumi per avvii post failures
$T_{\text{down}} = 4,32$	$P_{\text{idle}} = 1,2$	2,6	Consumi per permanenza in stato di guasto
$T_{\text{main}} = 10,08$	$P_{\text{maint}} = 0,6$	6	Consumi per operazioni di riparazione
$T_{\text{su}} * N_{\text{ct}} = 40$	$P_{\text{setup}} = 3$	120	Consumi per setup
$T_{\text{reducedspeed}} = (Q_t - Q_r) * \text{IdealCT} = 266$	$P_{\text{idle}} = 1,2$	319,2	Consumi per idle
$(Q_{\text{sr}} + Q_{\text{dp}}) * t_{\text{processing}} = 205 * 70 = 4$	$P_{\text{Processing}} = 5,8$	23,2	Consumi per difettosità

<sup>71</sup> E’ un dato calcolabile dalla media del periodo dei tempi presenti nel CMMS.



Si procede ora al calcolo degli Energy KPI in modo da evidenziare punti interessanti circa alcuni finding illustrati nel paragrafo 5.8. I risultati sono illustrati in tabella 6.4. Per il calcolo puntuale di ciascun indicatore ci si è basati sulle formule di calcolo 5.21, 5.22, 5.23, 5.24 e ovviamente sui dati riportati in tabella 6.3.

Tabella 6.4: Calcolo Energy KPI per il caso d'uso.

Energy KPI	Valore %
<i>Lean Energy Indicator</i>	0,8287
<i>Energy in Quality Losses (<math>E_{ql}</math>)</i>	0,99
<i>Energy in Speed Losses (<math>E_{sl}</math>)</i>	0,8787
<i>Energy in Downtime Losses (<math>E_{dl}</math>)</i>	0,9525

Si può verificare come:

$$\text{Lean Energy Indicator} = E_{dl} \times E_{sl} \times E_{ql}$$

$E_{ql}$  valorizza, attraverso il suo complemento ad 1, l'energia persa per problemi di qualità. Poiché il caso è semplificato,  $E_{ql}$  coincide in questo esempio con il tasso di scarto, dal momento che la macchina utensile selezionata per il caso applicava una stessa potenza di lavorazione indipendentemente dalle feature o dai tipi di pezzo da lavorare. In situazioni dove ci fossero pezzi diversi che richiedono lavorazioni più o meno energy-consuming, l'incremento di  $E_{ql}$  rispetto al tasso di scarto (corrispettivo indicatore applicato nella prospettiva manifatturiera) crescerebbe in funzione della potenza di lavorazione  $P_{\text{processing}}$  associata al singolo pezzo scartato. In pratica, dal punto di vista energetico, scartare un pezzo che richiede una potenza media di lavorazione di 5,8kW e uno che richiede 50kW è chiaramente ben diverso dal considerare le semplici quantità scartate!

I rallentamenti di sistema sono quelli che impattano in maniera più sentita sui consumi energetici rispetto ad altri tipi di perdite, come mostra l'indicatore  $E_{sl}$ . La potenza in idle è relativamente bassa rispetto agli altri tipi di power requirement della macchina selezionata, ma, dal momento che esistono notevoli occorrenze di eventi che causano rallentamenti del flusso produttivo, il consumo energetico sprecato in idle è rilevante.

Per quanto riguarda l'indicatore  $E_{dl}$ , esso, secondo il diagramma di rappresentazione delle perdite progettato da Nakajima, rappresenta l'impatto energetico di guasti e set up. Tali perdite rappresentano una seconda area di intervento, se si compara la percentuale di  $E_{dl}$  con  $E_{sl}$  e  $E_{ql}$ . Un'importante differenza da sottolineare rispetto agli indicatori tradizionali di affidabilità e di disponibilità è la presenza dei riavvii connessi a cause di guasto all'interno dell'indicatore  $E_{dl}$ . In particolare, ci si aspetta che  $E_{dl}$  risulti tanto più differente

dai classici indicatori time-based di disponibilità o affidabilità quanto più la potenza  $P_{\text{rampup}}$  è grande, dal momento che piccoli intervalli temporali hanno una grande impatto sui consumi energetici. Inoltre,  $E_{dl}$  è un indicatore di per sé diverso dal corrispettivo indicatore time-based utilizzato nell'OEE, dal momento che occorre distinguere, dal punto di vista energetico, uno stato in cui la macchina, in guasto, attende di essere riparata (assorbendo  $P_{\text{idle}}$ , posto ovviamente che non si tratti di un guasto totale in cui la macchina si spegne), e uno stato in cui viene riparata (assorbendo  $P_{\text{maint}}$ , per via di specifiche azioni di riparazione che prevedono un consumo di energia).

Dal momento che sono stati utilizzati Energy KPI del caso 2 trattato nel capitolo precedente, è possibile, in questa situazione, effettuare un'interpretazione di massima delle principali variabili di consumo energetico del mese, ma non si riuscirebbe ad isolare efficacemente le singole variabili come nel caso di un utilizzo di Energy KPI generati nel caso 1. Dunque, ai fini di dare un "significato" puntuale ai singoli consumi, in modo da comprendere dove il management può ottenere il massimo risultato col minor sforzo/cost, è possibile valutare in che modo i consumi energetici relativi al caso si collocano all'interno della matrice di consumo energetico. I consumi energetici calcolati in tabella 6.3 si collocano all'interno della matrice di consumo energetico come mostra la figura 6.3.

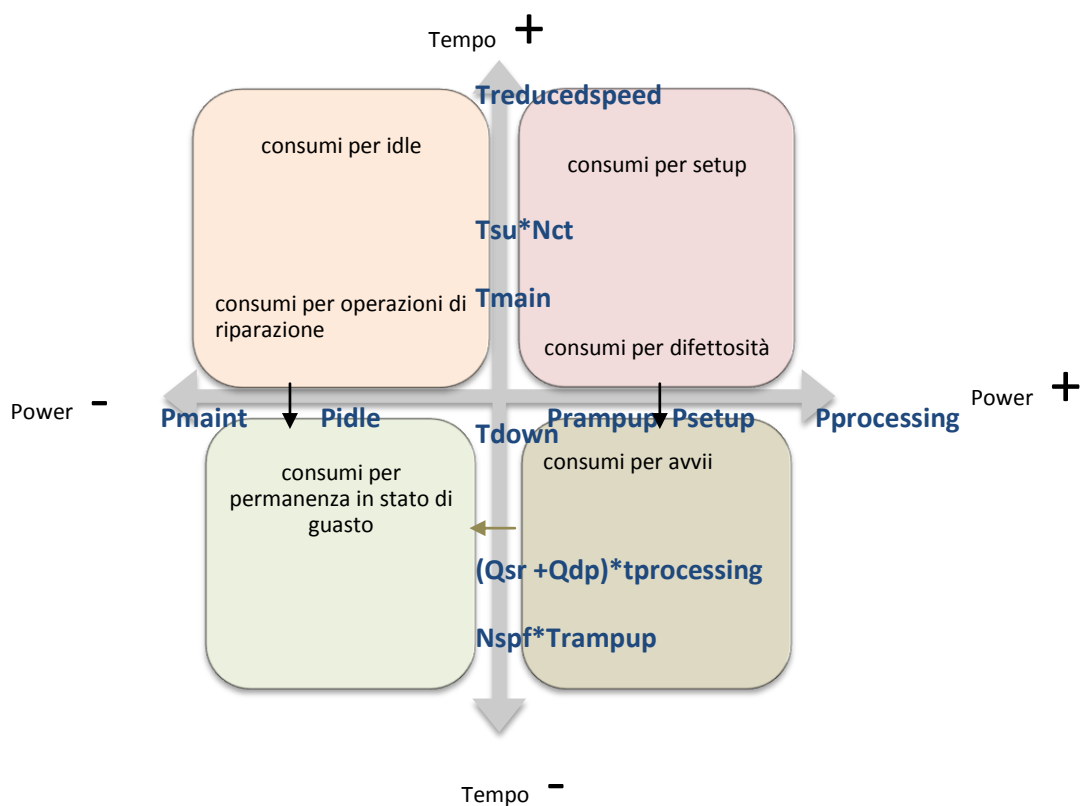


Figura 6.3: Matrice di consumo energetico nel caso di studio.

E' importante fare due annotazioni per quanto concerne la figura 6.3. Innanzitutto la collocazione di tempi, potenze e consumi in figura non può seguire per ovvi

motivi una disposizione su scala. In seconda analisi, la figura 6.3 è la matrice dei consumi energetici specifica per il caso d'uso, e non è da intendersi valida per tutte le fresatrici CNC, dal momento che le odierne fresatrici sono molto più potenti. Un esempio che si potrebbe fare, per quanto riguarda quest'ultima annotazione, è la collocazione dei consumi per avvii. Normalmente i consumi per avvii dovrebbero essere collocati nel quarto quadrante, ma in corrispondenza di potenze molto più elevate dei set up, dal momento che sono comuni in azienda valutazione sulla turnazione ideale proprio per un problema legato agli alti consumi energetici dell'avvio della macchina, dal costo dell'energia in determinate fasce orarie, e dal costo della manodopera.

Possiamo concludere che risulta molto interessante dal punto di vista dell'EM agire sui consumi inerenti gli stati di idle e setup in primis (coerentemente con quanto suggerito dagli indicatori  $E_{sl}$ ,  $E_{dt}$  rispettivamente) e successivamente sui consumi energetici spesi durante le operazioni di riparazione della macchina. L'effort/costo sostenuto per ridurre tali consumi, e il miglioramento ottenibile in termini assoluti non è per tutti uguale.

In particolare, leve complessivamente più efficace per ridurre i consumi energetici più elevati agiscono sul secondo quadrante della matrice, dal momento che è sufficiente intervenire attraverso una miglior gestione del sistema produttivo per poter veder ricondursi il consumo energetico nel quadrante "buono", il terzo quadrante. Nel caso di Same, è sufficiente un maggior training degli operatori e rivedere la politica di gestione degli utensili.

Nel primo quadrante si hanno alti consumi energetici di setup sia per il numero elevato dei cambi utensile nel periodo e sia per una Psetup piuttosto alta. Per cui, effettuare miglioramenti per ridurre il numero e la durata degli utensili contribuirebbe a ridurre il consumo energetico speso in setup, ma si "passerebbe", a miglioramento ottenuto, al quarto quadrante, dove anche intervalli di tempo piccoli impattano sul consumo totale, in funzione dell'entità delle potenze in gioco. Una riduzione ulteriore dei consumi energetici che permetta di passare al quadrante "buono" potrebbe avvenire in corrispondenza di miglioramenti tecnologici, che in questa trattazione sono *out of scope*.

## Capitolo 7 : CONCLUSIONI e SVILUPPI FUTURI

Il capitolo conclusivo della trattazione è suddiviso nelle sue sezioni di 7.1: *Conclusioni*, e 7.2: *Sviluppi Futuri*. La prima sezione tratta in particolare la soddisfazione dei gap di ricerca da parte dei contenuti sviluppati nella trattazione, e genera finding indirizzati sia al mondo della ricerca accademica che al mondo industriale. Gli sviluppi futuri

### 7.1: Conclusioni

#### 7.1.1: Soddisfazione gap di ricerca

Dal momento che la trattazione si propone di soddisfare i gap di ricerca generati all'interno della sezione 2.4: *Gap Analysis*, un buon punto di partenza per l'elaborazione delle conclusioni finali è senz'altro costituito da un'autoanalisi del grado di soddisfazione dei gap di ricerca da parte dei contenuti/metodi/approcci sviluppati nella trattazione. Il grado di soddisfazione dei gap di ricerca è illustrato in tabella 7.1: la prima colonna riporta il gap in analisi, la seconda colonna l'*industry need* al quale si riferisce, e la terza colonna indica qualitativamente il grado di soddisfazione attraverso un pallino secondo la seguente legenda:

- Contributo di piccola entità: necessità di approfondimenti e sviluppi futuri, sulla falsariga della metodologia sviluppata o attraverso altri metodologie/metodi/tool;
- Contributo di moderata entità: sviluppo correttamente eseguito ma ulteriormente raffinabile;
- Contributo di notevole entità: la trattazione ha cercato di colmare quanto più possibile il gap individuato. Esistono naturalmente occasioni e sviluppi futuri di miglioramento.

Infine, la quarta colonna fornisce la motivazione per la quale è stato assegnato un certo grado di soddisfazione a ciascun gap.

Tabella 7.1: Grado di soddisfazione dei gap di ricerca da parte della trattazione.

Gap #	Industry Need	Grado Soddisfazione GAP	Motivazione
<b>GAP 1:</b> Solo pochi degli indicatori aggregati attualmente esistenti sono adatti ad applicazioni di EM all'interno dello stabilimento	Focus più ristretto per supportare l'EM a livello di fabbrica: KPI di EE a livello stabilimento, macchina, processo. (es: termodinamici o fisico-termodinamici)	●	Sviluppo Energy KPI a livello Work Unit in ISA.95 per il settore del discrete Manufacturing. Applicazioni di utilizzo dedicate a macchine utensili e centri di lavoro. Metodologia potenzialmente estendibile a <i>scale</i> maggiori.
<b>GAP 2:</b> Benchmarking di EE tra stabilimenti difficoltoso, non sempre applicabile	KPI di EE a livello stabilimento orientati al benchmarking: comparare l'EE di stabilimenti e processi distinti	○	L'analisi delle relazioni di causa-effetto tra sistema manifatturiero e consumo energetico ha mostrato l'esistenza di un elevato numero di variabili che influenzano il consumo energetico. Gli Energy KPI sviluppati offrono ampie possibilità di impiego in applicazioni di benchmarking, dal momento che isolano puntualmente, in maniera più o meno disaggregata, le differenti variabili di consumo ( $E_{quality}$ , $E_{sat}$ , $E_{avail}$ , ecc). Ciononostante il benchmarking con i KPI sviluppati avrebbe senso solo in stabilimenti con caratteristiche produttive, di gestione e di mercato simili. Si suggerisce dunque un utilizzo combinato o alternativo di altri tool di analisi per "normalizzare" le caratteristiche produttive.
<b>GAP 3:</b> Gli indicatori non comunicano informazioni su <i>come</i> l'energia è utilizzata nei diversi processi: scarso supporto all'EM.	KPI di EE orientati all'identificazione delle inefficienze a livello stabilimento: feedback sull'efficienza di utilizzo dell'energia	●	Il purpose con i quali sono stati sviluppati gli Energy KPI è proprio quello di offrire un tool di analisi facilmente utilizzabile dal management per poter identificare le inefficienze e le aree di miglioramento in un'ottica di continuous improvement.
	Utilizzo di informazioni di consumo energetico in real time ad elevata granularità attraverso sensori smart	●	La metodologia sviluppata presuppone fortemente e utilizza al massimo del suo potenziale la sensor technology e il monitoraggio energetico.
<b>GAP 4:</b> Pochi framework concettuali e PMS di KPI di EE ben strutturati. Poche linee guida di selezione e utilizzo KPI	Sistemi di misura delle performance di EE e monitoring multilivello	○	Il framework di PMS Matrix di EE è utilizzato al solo scopo di rappresentare le possibili aree all'interno delle quali sviluppare nuovi Energy KPI, in modo tale che la metodologia venga calata in un contesto ben circoscritto. In un applicazione volta a realizzare un framework più strutturato o un framework concettuale presenta

			notevoli punti di sviluppo, che verranno trattati nella sezione successiva 7.2.
	Supporto alla definizione e utilizzo KPI	○	La metodologia cross view è stata dettagliata in step che guidano le aziende manifatturiere alla generazione e all'utilizzo degli Energy KPI. Non sono naturalmente stati trattati in maniera innovativa i processi di definizione e utilizzo di KPI di EE correnti o di KPI progettati per un purpose diverso da quello della trattazione.
<b>GAP 5:</b> Decision support tool in EM tramite sistemi di KPI non/poco sviluppati	Continuous improvement performance energy-related	○	La fase di utilizzo della metodologia cross view (step 6-Energy KPI System Design & Implementation) mostra in quale modo la metodologia e il sistema di indicatori progettati devono essere utilizzati da parte del management al fine di rendere effettivo il potenziale informativo offerto dagli indicatori.
	Comprensione delle relazioni tra gestione della produzione e performance energy-related	●	La <i>cross view</i> rappresenta la fase core della metodologia. E' stato generato un ampio panel di variabili di consumo energetico, raggruppate in cluster, rappresentato attraverso il diagramma di Ishikawa e associato ai diversi stati energetici della macchina utensile attraverso la <i>cross view</i> .

### 7.1.2: *Finding*: implicazioni teoriche e pratiche

In questo paragrafo verranno illustrate le implicazioni teoriche e pratiche sorte spontaneamente da un'overview di quanto sviluppato all'interno della trattazione. In particolare, le implicazioni teoriche fanno riferimento a finding indirizzati al mondo della ricerca accademica, mentre le implicazioni pratiche sono indirizzate al mondo dell'industry del discrete Manufacturing, in particolare al suo management. Per il modo in cui esse sono formulate, molte offrono collegamenti e spunti a possibili sviluppi futuri, trattati nella successiva sezione 7.2.

Le implicazioni teoriche più rilevanti sono riportate nell'elenco sottostante:

- l'area di analisi selezionata all'interno del PMS Matrix di EE corrisponde alla cella *Green Make-Work Unit*: la metodologia cross view ha sviluppato Energy KPI per la macchina utensile, o centro di lavoro. Si può ragionevolmente supporre che la scelta di un maggiore *scale* di analisi (ad esempio un'intera linea di produzione o un impianto) comporterebbe una minore granularità, e quindi una maggiore disponibilità, di dati (viste le possibilità di aggregazione degli stessi e la possibilità di formulare stime più accurate rispetto a quelle della singola macchina). Per contro

comporterebbe una maggior difficoltà di analisi del comportamento energetico della risorsa, dal momento che occorrerebbe tener conto di fenomeni di sovrapposizione e compensazione dei diversi elementi che compongono l'impianto o la linea. In tal caso risulterebbero necessari ambienti di simulazione e strumenti di analisi più sofisticati;

- l'area di analisi selezionata all'interno del PMS Matrix di EE corrisponde alla cella *Green Make-Work Unit*. Poiché il processo di *Green Make* mira, tra i suoi obiettivi, a gestire e ridurre lo spreco, sono stati generati Energy KPI annoverabili conseguentemente all'interno della categoria del *Lean Manufacturing*. Esistono negli ultimi tempi studi che propongono di integrare metodi di lean manufacturing ed efficienza energetica, e valutarne la bontà dell'integrazione (Rothenberg, Pil, & Maxwell, 2001), (Venkat & Wakeland, 2006). Seppur i metodi di lean manufacturing si rivelino particolarmente adatti nell'identificazione e implementazione di energy saving, essi possono comportare sia vantaggi che svantaggi in termini di efficienza energetica ed emissioni di CO<sub>2</sub>, in funzione dello *scope* di analisi considerato e di altri fattori che gli studiosi stanno analizzando. Si ritiene ad ogni modo che la trattazione abbia apportato un importante contributo all'interno del topic che vede l'integrazione tra lean manufacturing ed efficienza energetica, dal momento che gli Energy KPI sono stati sviluppati con un *purpose* particolarmente orientato ad un approccio lean di gestione dell'efficienza energetica. Nei confini di analisi stabiliti per questa trattazione si può concludere come un approccio di questo tipo possa ottenere energy saving migliorando i consumi energetici di una stazione operativa e riducendo le emissioni ad esse annessa, ma se lo *scope* della trattazione dovesse essere esteso rispetto a quello considerato (altre risorse all'interno dello stabilimento o altre organizzazioni della supply chain), questa valutazione andrebbe probabilmente incontro a trade-off;
- si ritiene particolarmente appropriata, nei confronti dello sviluppo di framework (e conseguentemente anche framework teorici o concettuali) di efficienza energetica la caratteristica di multidimensionalità e flessibilità di impiego. Il framework di PMS di EE, (nella trattazione il PMS Matrix di EE) è stato costituito da una dimensione di *processo*, realizzata attraverso un *process reference model*, e da una dimensione di *scale*, attraverso l'impiego di uno standard del settore manifatturiero. In questo modo si garantisce ad un ampio set di industry e applicazioni all'interno del Manufacturing, una descrizione standard dei processi ai quali gli indicatori di performance energetica si riferiscono e una scalabilità del livello di dettaglio degli stessi;

- la comprensione delle relazioni tra gestione della produzione e performance energy-related rivolta a *purpose* di analisi e miglioramento dell'efficienza energetica è un topic estremamente complesso, che può essere esaustivamente sviluppato solo attraverso un utilizzo congiunto di metodi e tool di analisi/modellazione/rappresentazione applicati sia alla prospettiva manifatturiera che alla prospettiva energetica di una risorsa energy-consuming di qualsivoglia livello . All'interno della trattazione sono stati utilizzati *support tool* quali il diagramma di Ishikawa per la rappresentazione delle relazioni di causa effetto tra stati manifatturieri e stati energetici, e il grafo di stato per la modellizzazione del comportamento energetico della risorsa. Nella sezione 7.2:*Sviluppi futuri* si forniranno suggerimenti per applicazioni più "evolute" di questi tool in relazione a studi orientati a migliorare l'EEM;
- la comprensione delle relazioni tra gestione della produzione, e in generale performance time-based, e performance energy-related necessita di un ampio set di dati da raccogliere e analizzare. L'esaustività e la qualità dei dati condiziona l'accuratezza delle analisi successive e i modelli derivabili, sia che trattino lo sviluppo di KPI, sia che trattino applicazioni diverse dalle misure di performance. Un esempio di tale implicazione all'interno della trattazione è l'accuratezza del processo di raccolta delle variabili di consumo energetico: maggiore è il numero di variabili di consumo energetico considerato, maggiore è il numero di Energy KPI sviluppati e maggiore è il contributo informativo apportato da tali KPI al management, dal momento che diventa più accurata l'individuazione delle cause puntuali di consumo energetico. Per contro, in questa situazione, diventa maggiore anche la difficoltà di approvvigionamento di dati necessari al calcolo dei KPI, del numero di relazioni di causa-effetto e generazione dei KPI;

Le implicazioni pratiche più rilevanti sono riportate nell'elenco sottostante:

- Si consiglia un approvvigionamento dei dati necessari alla comprensione delle relazioni tra performance time-based e performance energy-related attraverso due contributi informativi. Una parte dei dati necessari può essere ricavata da molteplici fonti in letteratura, se concepita in qualità di primo panel di dati di cui disporre. La parte complementare di tali dati deriva dalla conoscenza dello specifico sistema produttivo. A tal proposito sono suggeriti incontri di brainstorming tra attori differenti, coinvolgendo in particolar modo il livello operativo. Il brainstorming fa in modo che emerga un set di variabili di consumo energetico più completo possibile. Si raccomanda inoltre l'impiego di support tool di rappresentazione delle relazioni di causa-effetto, trattandosi di un problema fortemente complesso;



- Le aziende devono identificare il sistema produttivo di riferimento prima di qualsiasi analisi volta a migliorare l'EEM ,dal momento che esso condiziona fortemente le performance energetiche della risorsa energy-consuming a cui è rivolta l'analisi. Devono essere inoltre formalizzate le relazioni tra risorsa in analisi e sistema produttivo di riferimento, al fine di derivare un panel esaustivo e corretto di variabili di consumo energetico. E' stato effettuato un tentativo di classificazione delle possibili caratteristiche dei sistemi di produzione industriale che impattano sulle performance energetiche, elaborate attraverso un *template* funzionale all'identificazione del sistema produttivo di riferimento. E' ad ogni modo possibile l'esistenza di altre possibili caratteristiche dei sistemi di produzioni industriale non contemplate nel template;
- esistono dei driver che determinano la bontà e l'appropriatezza dell'utilizzo della metodologia da parte delle aziende manifatturiere: sono stati annoverati come driver significativi il livello di automazione/informatizzazione dello stabilimento, il consumo energetico della risorsa in analisi (attraverso ad esempio un indicatore quale il SEC) e l'impatto ambientale del processo operato dalla risorsa. Tali driver costituiscono idealmente tre dimensioni di un cubo all'interno del quale l'azienda "candidata" ad utilizzare la metodologia va a collocarsi: un posizionamento che vede un alto livello di automazione/informatizzazione, un alto consumo energetico (ad esempio per via di particolari lavorazioni eseguite dalla risorsa) e un alto impatto ambientale (ad esempio in virtù dei materiali utilizzati) rappresenterebbe una situazione particolarmente adatta all'applicazione della metodologia. Ad ogni modo, dal momento che sono stati delineati particolari trend all'interno del mondo industriale, si ritiene che aziende che rientrano nel "volume ottimo di applicazione" (Figura 5.2) possano applicare la metodologia precedentemente ad una applicazione più pervasiva da parte delle aziende manifatturiere;
- è stata fornita una rappresentazione delle relazioni di causa effetto tra stati manifatturieri e consumo energetico attraverso il diagramma di Ishikawa. La presenza di un elevato numero di variabili di II livello (per definizione, leve di management) in qualità di *cause secondarie* relative agli stati manifatturieri conferma l'ampia possibilità di ridurre i consumi energetici agendo sulla gestione del sistema produttivo (ovvero su tali variabili) piuttosto che su leve tecnologiche;
- la costruzione degli Energy KPI attraverso appropriati Energy Diagram consente ai valori restituiti dai KPI di non essere affetti da variazioni della domanda di mercato in termini assoluti. Fanno eccezione le variazioni di mix, per le quali si avrebbe una minore o maggiore incidenza dei setup

(ciò costituisce uno dei motivi per i quali il benchmark tra aziende attraverso gli Energy KPI risulta difficoltoso, e uno dei motivi per il quale il tipo di sistema produttivo di riferimento debba essere ben specificato). In termini di energy management, non avrebbe senso basarsi su KPI derivati da un Energy Diagram non organizzato secondo il principio applicato nella trattazione: valutare il contributo di ciascuno stato manifatturiero (esempio: consumo in *blocking & starvation for missing tool*) sul consumo energetico totale, oppure valutare il contributo degli stati inclusi in ciascun cluster (esempio: *Production Management*) sul consumo energetico totale è del tutto errato e porta a conclusioni fuorvianti. Se per esempio si considerasse di applicare quest'ultima situazione, qualora aumentassero gli idle o stand-by derivanti dai tempi di attesa per mancanza ordine o mancanza materiale (*External Causes*) diminuirebbe il contributo percentuale associato agli altri cluster. Si sarebbe portati a pensare ad un miglioramento da parte del *Production Management* o del *Maintenance* ad esempio, senza che gli attori appartenenti a tali cluster abbiano in alcun modo migliorato la propria performance. Inoltre, l'Energy Diagram fa in modo che il KPI sia affetto dalle sole performance che esso è chiamato a valutare (esempio: il solo impatto energetico dell'utilizzo dell'impianto), evitando fenomeni di sovrapposizione. Questo *finding* motiva la precedente argomentazione secondo la quale utilizzare il diagramma di pareto per valutare i maggior Energy KPI o i maggiori consumi energetici responsabili del consumo energetico nel periodo debba essere utilizzato *solo per valutazioni applicate al periodo corrente*, e non utilizzate per valutare il miglioramento o il peggioramento di determinate prestazioni (ad esempio di *Production Management*) su periodi di tempo diversi. Si raccomanda dunque un utilizzo di Energy Diagram di qualsivoglia livello di dettaglio per lo sviluppo di Energy KPI, purché strutturati secondo quanto eseguito in trattazione.

- non tutti gli alti consumi energetici sono uguali e potenzialmente "attaccabili" in termini di energy management: la matrice dei consumi energetici è costituita dalle dimensioni di tempo e potenza, e mostra le tipologie di consumo energetico su cui prestare maggiore attenzione, in relazione ad un'intenzione di migliorare le performance energetiche attraverso il management. L'area di consumo energetico più agevole da migliorare in termini di facilità e in termini di costo è quella costituita da alti tempi e basse potenze (box in alto a sinistra in figura 5.14), dal momento che la sola leva di management riuscirebbe a ridurre significativamente i consumi energetici di quest'area riducendo/ottimizzando il consumo;
- lo sviluppo degli Energy KPI ha evidenziato come esistano stati manifatturieri trascurabili da parte degli indicatori di performance time-

based che hanno invece forti impatti sulle performance energy-based. Tali stati sono idealmente collocati, all'interno della matrice dei consumi energetici (Figura 5.14), nella cella in basso a destra: piccoli intervalli temporali presentano elevati impatti di consumo energetico. L'esempio più rappresentativo è lo stato che corrisponde all'avvio della macchina (*starting*), sia per esigenze di turnazione, sia a causa di un guasto totale. L'occorrenza di tali stati deve essere evitata quanto più possibile (compatibilmente con le esigenze di produzione, ad esempio l'esigenza di accendere e spegnere le macchine per la normale produzione secondo calendario lavorativo, o rispettare il ciclo delle lavorazioni che il mix produttivo richiede). Consumi caratterizzati da alti tempi e alte potenze (cella in alto a destra) possono anch'essi essere migliorati attraverso leve di management, evitandone l'occorrenza in produzione, per poi "rientrare" idealmente a far parte della suddetta categoria di consumi appena illustrata (si veda freccia in figura 5.14).

- le azioni di miglioramento di KPI energy-related che integrano relazioni di causa-effetto tra performance manifatturiere e performance energetiche hanno un impatto *diretto* sia su performance energetiche e indiretto performance manifatturiere time-based. Gli effetti di un miglioramento/peggioramento delle performance time-based (esempio: *missing orders*) hanno un impatto tanto più amplificato all'interno degli Energy KPI quanto maggiore è l'entità del power requirement ad esso associato tramite la cross view.

Le ultime tre implicazioni si ritengono valide e importanti in qualità di contributo apportato nell'area di ricerca dei metodi di lean manufacturing applicati al miglioramento dell'EEM, in particolare per quanto concerne le relazioni tra performance manifatturiere e performance energetiche.

### 7.1.3: Benefici e limitazioni

Si illustrano ora i principali benefici della metodologia sviluppata e le sue principali limitazioni. Si ricorda che limitazioni connesse ad una parziale soddisfazione dei gap di ricerca, illustrate in tabella 7.1, non verranno prese in considerazione, dal momento che la colonna "motivazione" in tabella 7.1 fornisce spiegazioni circa l'incompleta soddisfazione del gap. Alcuni dei benefici apportati dalla metodologia sono stati già illustrati in quanto implicitamente associati a particolari implicazioni pratiche o teoriche illustrate nel paragrafo precedente.

I benefici più rilevanti riguardano:

- il supporto fornito dalla metodologia nella comprensione e formalizzazione delle variabili di consumo energetico in relazione al consumo energetico di una risorsa produttiva;

- la possibilità di visualizzare i trade-off tra performance di gestione del sistema produttivo in termini energetici, ad esempio un eventuale ottimizzazione del sequenziamento dei pezzi per ridurre numero e durata dei set up potrebbe impattare in un maggior consumo di idle e stand-by;
- il supporto alla definizione e al controllo del successo di un action plan in iniziative volte ad ottenere energy saving, attraverso l'identificazione delle responsabilità di consumo energetico, l'assegnazione di determinati task definite
- un miglioramento congiunto in performance energetiche e performance time-based manifatturiere, *se considerato il solo scope di analisi*.

Esistono alcune limitazioni importanti da tenere conto. Se ne illustrano le principali, riportando congiuntamente alcune notazioni a riguardo:

- la metodologia cross-view ha sviluppato Energy KPI in relazione all'unità minima di analisi per lo scope in questione: la stazione operativa. E' ad ogni modo doveroso precisare che iniziative di energy saving in relazione ad una singola risorsa non garantiscono l'ottimalità della soluzione né in relazione all'intero sito produttivo, né in relazione all'intera supply chain, a maggior ragione.

La letteratura riporta numerosi esempi a riguardo: ridurre l'energia sprecata per la produzione di problemi di qualità comporta d'altra parte un aumento del consumo energetico dovuto a maggiori controlli di qualità. E' infatti famosa la research question "Is lean necessarily green?". Ragion per cui è necessario riferirsi ad unità di analisi più omnicomprensive, in modo da poter generare soluzioni di trade-off complessivamente "buone". Quanto illustrato in questo punto costituisce più un'annotazione che una limitazione, dal momento che l'obiettivo *core* della metodologia è la generazione "ragionata" di Energy KPI attraverso un processo strutturato basato su relazioni di causa effetto piuttosto che la definizione di action plan e programmi di energy saving;

- la disponibilità di dati del SI limita il processo di generazione e calcolo dei KPI allo stato attuale. Ad ogni modo, questo limite esiste nella misura in cui si considera una prospettiva di applicazione attuale della metodologia; ma dal momento che si tratta di una metodologia sviluppata in prospettiva di chiari trend di utilizzo del potenziale di monitoring energetico multilivello e della sensor technology si ritiene che questa non possa essere annoverata come limitazione della metodologia, e tantomeno non vengono annoverate argomentazioni circa i costi di un sistema di monitoraggio energetico;

- Per il calcolo degli Energy KPI sono state considerate potenze medie anche nel caso di potenze con comportamento variabile nel tempo (come quella di processing, di set up e ramp up) per rendere più leggibile la lettura degli indicatori. Sistemi informativi che implementino la metodologia devono invece considerare il consumo energetico relativo agli stati di processing, set up e ramp up come integrale della funzione potenza nel tempo;
- In corrispondenza di ogni iniziativa di energy saving e programmi di efficienza energetica deve essere valutato il costo delle azioni proposte per abilitare il miglioramento dell'EE, comparandolo con i benefici. Trattandosi di approcci proposti volti a fare efficienza riducendo gli sprechi si ritiene che le considerazioni economiche circa il costo di tali programmi sia superflue, dal momento che si tratta di azioni che a basso costo producono ampi benefici, e soprattutto se comparate ad iniziative di EEM che utilizzano leve tecnologiche;
- Il miglioramento continuo delle performance di consumo energetico attraverso l'analisi degli Energy KPI, il setting di obiettivi e la definizione di un action plan non produce alcun beneficio in mancanza di commitment e coinvolgimento da parte di tutte le figure coinvolte nel miglioramento. In questo senso il ruolo del management è fondamentale per l'efficacia delle azioni di miglioramento, attribuendo in dettaglio a determinate figure task, responsabilità, e incentivi.

## 7.2: Sviluppi futuri

In conclusione, si illustrano gli sviluppi futuri derivabili da ulteriori estensioni o approfondimento di quanto trattato. In particolare, gli sviluppi futuri potrebbero suggerire un'estensione dello scope di analisi considerato nella metodologia, un impiego più evoluto dei tool utilizzati nella trattazione per *purpose* differenti da quelli strettamente trattati, o l'approfondimento di aree non esaustivamente sviluppate nel corso della trattazione.

- All'interno delle implicazioni teoriche è stato illustrato come la comprensione delle relazioni tra gestione della produzione e performance energy-related rivolta a *purpose* di analisi e miglioramento dell'efficienza energetica sia un topic estremamente complesso, che può essere esaustivamente sviluppato solo attraverso un utilizzo congiunto di metodi e tool di analisi/modellazione/rappresentazione applicati sia alla prospettiva manifatturiera che alla prospettiva energetica di una risorsa

energy-consuming di qualsivoglia livello. In particolare, è possibile utilizzare gli stessi tool impiegati nella trattazione, ma in forma più “evoluta”. Ad esempio, la modellizzazione tramite grafo di stato può essere usata a supporto della simulazione ad eventi discreti, al fine di studiare il comportamento energetico delle risorse in corrispondenza di diversi scenari, e/o prevederne i consumi energetici, fornendo importanti informazioni ad esempio riguardanti la migliore scelta del contratto di fornitura, o la turnazione ideale per lo stabilimento.

Possono, in alternativa o congiuntamente alla proposta appena illustrata, essere usati altri tool, ad esempio di rappresentazione delle relazioni di causa effetto. Uno dei migliori tool preposto per tale scopo è il Causal Loop Diagram, supportato dal software Vensim. Esso consente di connettere gli elementi relazionati da legami di causa-effetto, stabilire i segni e gli eventuali loop tra i legami, e scrivere equazioni per ciascun legame;

- Si potrebbe valutare quali siano le relazioni di causa-effetto tra i diversi KPI di EE esplorati all'interno della revisione bibliografica, utilizzando a tal proposito il Causal Loop Diagram. Si studierebbe la natura diretta o indiretta dei legami, i segni e l'intensità dei legami, gli eventuali loop, e le variabili che condizionano le relazioni di causa effetto;
- Sarebbe possibile valutare altre possibilità di sviluppo di metodologie rivolte a migliorare l'EEM all'interno di altre celle individuate dal PMS Matrix di EE. Le metodologie possono consistere sia nello sviluppo di appropriati KPI, oppure nello sviluppo di altri strumenti. Si potrebbe valutare ad esempio il contributo dei processi di *Plan* (esempio: gestione delle scorte, o pianificazione della capacità produttiva) sulle performance energetiche dello stabilimento o dell'intera supply-chain, tramite ambienti di simulazione supportati da KPI per la valutazione di differenti scenari;
- Gli Energy KPI generati potrebbero essere utilizzati in ambienti di simulazione per valutare l'efficacia nel tempo delle azioni rivolte ad ottenere energy saving a livello macchina. Ma, dal momento che i sistemi di produzione rappresentano ambienti estremamente complessi in cui un ottimo globale non rappresenta la somma di ottimi locali, si dovrebbe ragionevolmente estendere lo scope della trattazione ad una linea, ad uno stabilimento, ad una porzione di supply-chain, al fine di poter formulare soluzioni complessivamente “buone” per interi sistemi produttivi. La metodologia sviluppata, partendo dall'unità più piccola di analisi di uno stabilimento di discrete Manufacturing, pone le basi per estensioni rivolte a scale successivi.

## BIBLIOGRAFIA

- Anderberg. (2012). "Methods for improving performance of process planning for CNC machining - An approach based on survey and analytical model - PhD Thesis. *Chalmers University of Technology, Gotemborg*.
- Ang. (2006). Monitoring changes in economy-wide energy efficiency: From energy-gdp ratio to composite efficiency index. Hong Kong Editorial Board meeting presentations. *Energy Policy, 34(5)*, 574-582.
- ANSI/ISA-95.00.01-2010. (s.d.). (IEC 62264-1 Mod) Enterprise-Control System Integration – Part 1: Models and Terminology.
- Artley, Ellison, & Kennedy. (2001). The performance based management handbook.
- Audzeyeva. (2010). Approaches and measurement for energy efficiency in manufacturing: an investigation into automotive industry.
- Azapagic, & Perdan. (2000). Indicators of sustainable development for industry: a general framework. *Trans Inst Chem Eng 78B*. 244-246.
- Bauer. (2004). *KPIs- the metrics that drive performance management. The power of metrics*. <http://www.grtcorp.com/sites/grtcorp.com/files/Bauer%203394.pdf>.
- Berndt, E. (1978). Aggregate energy, efficiency, and productivity measurement. *Annual Review of Energy 3*,, 225-273.
- Berrah, & Cliville. (2007). Towards an aggregation performance measurement system model in a supply chain context. *Computers in Industry 58*, 709-719.
- Boie, & Kannan. (2003). Energy management practices in SME - case study of a bakery in Germany. *Energy Conversion and Management, 44 (6)*, 945-959.
- Bonneschky. (2005). Tools, die den Zusammenhang von Technik und Wirtschaftlichkeit nutzbar machen – Integration energiewirtschaftlicher Aspekte in Systeme der Produktionsplanung und –steuerung” . *Springer Verlag*, 187-299.
- Bourne. (1999). Designing and implementing a balanced Performance Measurement System. *University of Cambridge*.
- Bourne, Mills, Wilcox, Neely, & Platts. (2000). Designing, implementing and updating performance measurement systems . *International Journal of Operations & Production Management, Vol. 20 No. 7* , 754-771.
- Boyd. (2006). Motivating auto manufacturing energy efficiency through performance-based indicators. . *Technical report, SAE Technical Paper Series*.

- Boyd, Dutrow, & Tunnessen. (2008). The evolution of the "energy star" energy performance indicator for benchmarking industrial plant manufacturing energy use. *Journal of Cleaner Production*, 16(6), 709-715.
- Boyd, Dutrow, & Tunnessen. (2008). "The evolution of ENERGY STAR® energy performance indicator for benchmarking industrial plant manufacturing energy use. *Journal of Cleaner Production Vol. 16*, 709-715.
- Boyd, Hanson, & Sterner. (1988). Decomposition of changes in energy intensity: a comparison of the Divisia index and other methods. *Energy Economics* 10 (4) , 309-312.
- Braglia, Zanoni, & Zavanella. (2003). Measuring and benchmarking productive systems performances using DEA: an industrial case. . *Production Planning & Control* 14 , 542-554.
- Brandolese, A., & Garetti, M. (1981). *Processi produttivi. Criteri di scelta e progettazione*. Milano: Clup.
- Brandolese, Pozzetti, & Sianesi. (1995). *Gestione della Produzione Industriale*. Hoepli.
- Brundtland. (1987). *Report at world commission on environment and development*. Technical report, United Nations.
- Bunse. (2011). Energy Management in Production Systems- Integrating Energy Efficiency as Performance Target Area in Production Management. *Dipl.-Wi.-Ing., University of Karlsruhe*.
- Bunse, & Vodicka. (2010). Managing Energy Efficiency in Manufacturing Processes - Implementing Energy Performance in Production Information Technology Systems. In: Berleur, J.,Hercheui, M. & Hilty, L. eds. *What Kind of Information Society? Governance, Virtuality Surveillance, Sustainability, Resilience*. Springer Boston, 260-268.
- Bunse, & Vodicka. (2011). IT-Einsatz spart Energie - Energieeffizienz industrieller Prozesse steigern. *IT&Production*, 2, 76-78.
- Bunse, Sacks, & Vodicka. (2009). Evaluating energy efficiency in manufacturing processes. Proceedings of the international conference on advances in production management systems conference, Bordeaux, France.
- Bunse, Vodicka, & Schneider. (2010). Enhanced Production Management Approaches – Integrating Energy Efficiency Performance into Companies Decision Making Processes. *ETH Zurich, BWI Center for Industrial Management, 8092 Zurich, Switzerland*.
- Bunse, Vodicka, Schönsleben, Brühlhart, & Ernst. (2011). Integrating energy efficiency performance in production management e gap between industrial needs and scientific literature. *Journal Of Cleaner Production*.
- Bureau of Energy Efficiency, Energy Management & Audit. (s.d.). <http://www.em-ea.org/Guide%20Books/Book-1/1.3%20Energy%20management%20&%20Audit.pdf>.



- Calabrese, A. (2004). *Gestione degli impianti industriali*. Milano: CUSL.
- Calvanese. (2012). Modellazione e analisi del consumo energetico di una macchina utensile e ottimizzazione delle condizioni di taglio. *Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Gestionale*.
- Cannata. (2011). *A Methodology to enhance energy efficiency at factory level: Improvements for Sustainable Manufacturing*. Politecnico di Milano.
- Capehart, B., Turner, W. C., & Kennedy, W. J. (2008). *Guide to Energy Management*. . The Fairmont Press.
- CECIMO. (s.d.). *Comité Européen de Coopération des Industries de la Machine Outil*. <http://www.cecimo.eu/>.
- Chen, Bor, & Wu. (2007). Structure model of energy efficiency indicators and applications ". *Energy Policy 35*, 3768-3777.
- Chryssolouris, G. (2006). *"Manufacturing Systems: Theory and Practice", third ed.,*. New York: Springer-Verlag.
- Cliville. (2004). Approche systé mique et mé thode multicrite`re pour la de´finition d'un syste`me d'indicateurs de performance. . *Ph.D. of Universite´ de Savoie*.
- Dahmus, & Gutowski. (2004). An environmental analysis of machining. *Proceedings of 2004 ASME International Mechanical Engineering Congress and RD&D Expo*. Anaheim, California USA.
- Dahmus, & Gutowski. (2004). An environmental analysis of machining . *In ASME International Mechanical Engineering Congress, Anaheim California, USA, 13-19*.
- DeCanio, S. (1993). Barriers within firms to energy-efficient investments. . *In Energy Polici 21* (p. 906-914).
- DeCanio, S. W. (1998). Investment in energy efficiency: do the characteristics of the of firms matter? *The Review of Economics and Statistics 80*, 95-107.
- Dhafr., M. A. (2002). Establishing and improving manufacturing performance measures. . *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 18*, 171-176.
- Diakaki C., G. E. (2006). A risk assessment approach in selecting environmental performance indicators, Management of Environmental Quality. . *An International Journal Vol. 17, No. 2, , Emerald Group Publishing Limited*.
- Dixon, Nanni, & Vollmann. (1990). *The New Performance Challenge: Measuring Operations for World-class Competition*, Business One Irwin, Homewood, IL.
- Doran. (1981). There's a S.M.A.R.T. way to write management's goals and objectives. . *Management Review, Volume 70, Issue 11 (AMA FORUM)*, 35-36.

- EC. (2006). *Action Plan for Energy Efficiency: Realising the Potential*.
- EC. (2008). *20 20 By 2020. Europe's Climate Change Opportunity*.  
[http://www.energy.eu/directives/com2008\\_0030en01.pdf](http://www.energy.eu/directives/com2008_0030en01.pdf).
- EC. (2009). *ICT and energy efficiency - the case for manufacturing: Recommendations of the Consultation Group*.  
[http://ec.europa.eu/information\\_society/events/ict4ee/2009/docs/files/ec/ec/infso/g2/Smart\\_Manufacturing.pdf](http://ec.europa.eu/information_society/events/ict4ee/2009/docs/files/ec/ec/infso/g2/Smart_Manufacturing.pdf).
- EC. (2009). The Sectoral e-Business Watch e ICT and e-Business Impact Studies ICT for innovation and a sustainable economy. .
- EC. (2010). *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Analysis of Options to Move beyond 20% Greenhouse Gas Emission Reductions and Assessing the Risk of Car*. <http://ec.europa.eu>.
- EEA. (2010). *European Environmental Agency*. <http://www.eea.europa.eu/>.
- EESI. (s.d.). Environmental and Energy Study Institute . <http://www.eesi.org>.
- EIA. (2010). *International energy outlook. Technical report, U.S. Energy Information Administration*.
- Eichhammer. (2004). Industrial energy efficiency. *Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research*.
- Eichhammer, W. (2004). Industrial energy efficiency. In: Cleveland, C.J. (Ed.). In *Encyclopedia of Energy*. Elsevier, New York (p. 383-393).
- Erlach. (2010). Energy Efficiency in Manufacturing Using the Energy Value Stream Method for building an energy efficient factory.
- Erlach, W. (2009). *Energiewertstrom: Der Weg zur energieeffizienten Fabrik Stuttgart: Fraunhofer Verl.*
- Farla, & Blok. (2000). The use of physical indicators for the monitoring of energy intensity developments in The Netherlands 1980–1995. *Energy* 25, 609-638.
- Farla, Blok, & Schipper. (1997). Energy efficiency development in the pulp and paper industry: A cross-country comparison using physical production data. . *Energy Policy*, 25 (7-9), 745-758.
- Feng, & Joung. (2009). An overview of a proposed measurement infrastructure for sustainable manufacturing. In *Proceedings of the 7th Global Conference on Sustainable Manufacturing*.
- Fitzgerald, Johnston, Brignall, Silvestro, & Voss. (1991). Performance Measurement in Service Business. *The Chartered Institute of Management Accountants*.

- Frauenhofer-Gesellschaft. (2008). Energieeffizienz in der Produktion. Untersuchung zum Handlungs- und Forschungsbedarf.
- Furlanetto, Garetti, & Macchi. (s.d.). *Principi generali di gestione della manutenzione*. Franco Angeli .
- Garetti, M., & Taisch, M. (1995). *Sistemi di produzione automatizzati*. Milano: CUSL.
- Gesellschaft, F. (2008). *Energieeffizienz in der Produktion - Untersuchung zum Handlungs- und Forschungsbedarf (funded by BMBF)*.
- Ghalayini, & Noble. (1996). The changing basis of performance measurement". ,*International Journal of Operations and Production Management*, Vol. 16 No. 8, 63-80.
- Glavick, & Lukman. (2007). Review of sustainability terms and their definitions. *Journal of Cleaner Production* 15 , 1875-1885.
- Grobot. (1998). Objective satisfaction assessment using neural nets for balancing multiple objectives. *International Journal of Production Research* 36, 2377-2395.
- GRI. (2006). Sustainability reporting guidelines. Technical report, Global Reporting Initiative.
- Groot, H. V. (2011). 2Energy saving by firms: decisionmaking,barriers and policies. In *Energy Economics* 23 (p. 717-740.).
- Group, T. C. (2008). *SMART 2020: Enabling the Low Carbon Economy in the Information Age*. [http://www.smart2020.org/\\_assets/files/02\\_Smart2020.Report.pfd](http://www.smart2020.org/_assets/files/02_Smart2020.Report.pfd).
- Gunasekaran, Patel, & Tirtiroglu. (2001). Performance measure and metrics in a supply chain environment.
- Gunasekarana, Patelb, & McGaugheyc. (2004). A framework for supply chain performance measurement. *Int. J. Production Economics* 87 , 333-347.
- Gutowski, Dahmus, & Thiriez. (2006). Electrical Energy Requirements for Manufacturing Processes. *Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139, 13th CIRP INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIFE CYCLE ENGINEERING*.
- Hammond, Adriaanse, Rodenburg, Bryant, & Woodward. (1995). Environmental indicators: A SYSTEMATIC APPROACH TO MEASURING AND REPORTING ON ENVIRONMENTAL POLICY PERFORMANCE IN THE CONTEXT OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT. *World Source Institute*.
- Hanley, M. S. (2009). Nick Hanley, Peter G. McGregor, J. Kim Swales, and Karen Turner. Do increases in energy efficiency improve environmental quality and sustainability? *Ecological Economics*, 68(3). 692-709.
- Hendrik, & Verfaillie. (2000). Measuring eco-efficiency: A guide to reporting company performance. Technical report, World Business Council for Sustainable Development.

- Henri, & Journeault. (2008). Environmental performance indicators: An empirical study of Canadian manufacturing firms. *Journal of Environmental Management*, 87(1), 165-176.
- Herrmann, & Thiede. (2009). Process chain simulation to foster energy efficiency in manufacturing. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 1(4), 221–229.
- Herrmann, Bergmann, Thiede, & Zein. (2007). Energy labels for production machines: an approach to facilitate energy efficiency in production systems. *In: Proceedings of the 40th CIRP International Seminar on Manufacturing*.
- Herva, Franco, Carrasco, & Roca. (2011). Review of corporate environmental indicators. *Journal of Cleaner Production*, 1687-1699.
- Hon. (2005). Performance and evaluation of manufacturing systems. *CIRP. Annals - Manufacturing Technology*, 54(2), 139-154.
- <http://kpilibrary.com>. (s.d.).
- Huizing, & Dekker. (1992). Helping to pull our planet out of the red: an environmental report of BSO/Origin. *Accounting, Organizations and Society* 17(5), 449-458.
- IEA. (2004). *Oil crisis & climate challenges: 30 Years of energy use in IEA countries*. OECD-IEA. Paris, France.
- IEA. (2007). *Feedstock Substitutes, Energy Efficient Technology and CO2 Reduction for Petrochemical Products. Workshop Proceedings*.
- IEA. (2007). *Tracking industrial energy efficiency and CO2 emissions*. International Energy Agency.
- IEA. (2008). *Worldwide Trends in Energy Use and Efficiency, Key Insights from IEA Indicator Analysis*. [http://www.iea.org/Textbase/Papers/2008/indicators\\_2008.pdf](http://www.iea.org/Textbase/Papers/2008/indicators_2008.pdf) [Accessed 29.10.2011].
- IEA. (2008b). Assessing measures of energy efficiency performance and their application in industry.
- IEA. (2008b). *International Energy Agency. Energy Efficiency Policy Recommendations Worldwide Implementation*.
- IEA. (2009). *Towards a more energy efficient future: Applying indicators to enhance energy policy*.
- IEA. (2010). *Key World Energy Statistics*. [http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2010/key\\_stats\\_2010.pdf](http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2010/key_stats_2010.pdf).
- IEC. (2003). INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION: Part 1: Models and terminology. [http://webstore.iec.ch/preview/info\\_iec62264-1%7Bed1.0%7Den.pdf](http://webstore.iec.ch/preview/info_iec62264-1%7Bed1.0%7Den.pdf).
- IMS2020. (s.d.). *IMS2020 - Action Roadmap on Key Areas 1, 2 and 3*, <http://ims2020.net>.
- Institute, L. M. (2003). Developing a Green Supply Chain Analytical Tool.

- Irrek, & Thomas. (2008). Definition Energieeffizienz, [http://www.wupperinst.org/uploads/tx\\_wibeitrag/energieeffizienz\\_definition.pdf](http://www.wupperinst.org/uploads/tx_wibeitrag/energieeffizienz_definition.pdf).
- ISA-95. (2006). *ISA-95-Based Operations and KPI Metrics Assessment and Analysis*. WHITE PAPER 24 A Mesa International, ISA and Invensys Wonderware co-branded white paper.
- Ishikawa, K. (1969). "Cause and Effect Diagram". *Proceedings, International Conference on Quality Control, JUSE, Tokyo*, 607-610.
- Ishikuma, T. (2011). International Standardization for Low-Carbon Society - Status of Energy Efficiency and Environmental Guidelines –. *SICE Annual Conference 2011*. Waseda University, Tokyo, Japan.
- ISO. (2011). Win the challenge with ISO 50001. [http://www.iso.org/iso/iso\\_50001\\_energy.pdf](http://www.iso.org/iso/iso_50001_energy.pdf).
- ISO. (s.d.). International Organization Standardization . *Iso website*.
- ISO/DIS22400-2. (2011). Automation systems and integration — Key performance indicators for manufacturing operations management —.
- ISO14.031. (1998). International Standard Organisation Environmental performance evaluation. ISO/DIS.
- ISO14031. (1999). (International Standard Organisation)environmental management environmental performance evaluation – guidelines .
- ITIA-CNR. (2011). *Analisi energetica di una macchina utensile*. Milano.
- Jaques, & Sinyugin. (2000). Energy efficiency indicators - a study of energy efficiency indicators for industry in apec economies. . *Technical report, Asia Pacific Energy Research Centre*.
- Jasch. (2000). Environmental performance evaluation and indicators. *Journal of Cleaner Production* 8, 79–88.
- Jovane, F. Y. (2008). The incoming global technological and industrial revolution towards competitive sustainable manufacturing. In *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 57 (p. 641-659).
- Kannan, & Boie. (2003). Energy management practices in SME - case study of a bakery in Germany. *Energy Conversion and Management*, 44 (6), 945-959.
- KAP. (2011). : Knowledge, Awareness, Prediction. Report of PPI Analysis for Considered Domains and Optimisation Targets. Programme: Factories of the Future PPP.
- Kaplan, R., & Norton, D. (1992). The balanced scorecard—measures that drive performance. *Harvard Business Review* , 71-79.
- Karnouskos, Colombo, Lastra, M., & Popescu. (2009). Towards the Energy Efficient Future Factory. 7th IEEE International Conference on Industrial Informatics, 2009. Piscataway, NJ: IEEE.

- Kordonowy, D. (2002). *A Power Assessment of Machining Tools," Bachelor of Science Thesis in Mechanical Engineering.* Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts.
- Lamontagne, Kusik, L., Benson, & Wright. (2000). Overview of energy flow for industries in standard industrial classifications. *Technical report, Arthur D. Little, Inc. for U.S. Department of Energy, Office of Industrial Technology, 20-39.*
- LBNL. (2007). "Energy Efficiency Indicators Methodology Booklet", S. de la Rue du Can, J. Sathaye, L. Price, M. McNeil, LBNL, Berkeley, CA, for the World Bank and the IEA.
- LCSP, L. C. (1998). Sustainable Production: A Working Definition. Informal Meeting of the Committee Members.
- Lebas., M. J. (1995). Performance measurement and performance management. *International Journal of Production Economics, 41(1-3), 23-35.*
- Lingle, & Schiemann. (1996). From balanced scorecard to strategy gauge: is measurement worth it? *Management Review , 56-62.*
- Marco Mazzarino, A. F.-T. (2008). Il check up della logistica italiana: il monitoraggio delle performance logistiche delle imprese in Italia e indicazioni di policy. *Osservatorio Nazionale sul Trasporto Merci e la Logistica .*
- McKinsey. (2011). *Resource revolution: meeting the world's energy, material, food, and water needs, .*
- McKinsey Deutschland, 2. (2009). *Wettbewerbsfaktor Energie. Neue Chancen für die deutsche Wirtschaft.*  
[http://www.cars21.com/files/news/Wettbewerbsfaktor\\_Energie\\_McKinsey&Co\\_Inc\\_2009.pdf](http://www.cars21.com/files/news/Wettbewerbsfaktor_Energie_McKinsey&Co_Inc_2009.pdf).
- McMann, & Nanni. (1994). Is your company really measuring performance'. *Management Accounting (US).*
- Morthorst, P. (2001). Interactions of a tradable green certificate market with a tradable permits market. In *Energy Policy 29* (p. 345-353).
- Morvay, & Gvozdenac. (2008). Applied industrial energy and environmental management. *IEEE press.*
- Morvay, & Gvozdenac. (2008). Applied industrial energy and environmental management. *IEEE press, 434.*
- Morvay, & Gvozdenac. (2008). Applied industrial energy and environmental management. Wiley - IEEE. Wiley.
- Muchiri, & Pintelon. (2008). Performance measurement using overall equipment effectiveness: literature review and practical application discussion. *International Journal of Production Research.*

- Mukherjee, K. (2008). Energy use efficiency in U.S. manufacturing: a nonparametric analysis. In *Energy Economics* 30 (p. 70-96).
- Müller, E. L. (2009). *Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben Berlin: Springer*.
- Müller, Engelmann, Löffler, & Strauch. (2009). *Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben Berlin: Springer*.
- Muñoz-Lopez. (2010). *PROCESS DEFINITION FOR THE IMPLEMENTATION OF AN ENERGY EFFICIENCY PROGRAM IN MANUFACTURING FOCUSED ON KEY PERFORMANCE INDICATORS*. Politecnico di Milano.
- Najmi, Rigas, J., & Fan., I.-S. (2005). A framework to revieperformance measurement systems. *Business Process Management Journal* 11. 109-122.
- Nakajima. (1988 ). Introduction to TPM: Total Productive Maintenance. *Productivity Press: Cambridge, MA*.
- Neely. (1999). The performance measurement revolution: why now and what next. *International Journal of Operations & Production Management* 19 (2), 205-228.
- Neely, Gregory, & Platts, K. (1995). Performance measurement system design: a literature review and research agenda . *International Journal of Operations & Production Management, Vol. 15 No. 4*, 80-116.
- Neely, Mills, Gregory, & Platts. (1995). Performance measurement system design—a literature review and research agenda. *International Journal of Operations and Production Management, Vol. 15, No. 4*, 80-116.
- O'Callaghan, P. &. (1977). Energy management. *Applied Energy*, 3 (2),. 127-138.
- Pandolfo, D. (2010). IMPLEMENTING AN ENERGY MANAGEMENT SYSTEM: STATUS EVALUATION AND CONCEPT FOR IMPLEMENTING ENERGY CONSUMPTION DATA MONITORING INSTRUMENTS USING THE EXAMPLE OF KNORR-BREMSE. *Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Gestionale*.
- Patterson. (1996). What is energy efficiency? Concepts, indicators and methodological issues. *Energy Policy. Vol. 24, No. 5*, 377-390.
- Pehnt. (2010). *Energieeffizienz : ein Lehr- und Handbuch Heidelberg: Springer*.
- Pehnt. (2010). *Energieeffizienz : ein Lehr- und Handbuch Heidelberg: Springer*.
- Phylipsen. (2010). Energy efficiency indicators: Best practice and potential use in developing country policy making. *Best practice and potencial use in developing country policy making*.
- Phylipsen, Blok, & Worrell. (1997). International comparisons of energy efficiency- Methodologies for the manufacturing industry. *Energy Polity, Vol. 25, Nos. 7-9*, 715-725.

- Phylipsen, Blok, & Worrell. (1998). Handbook on international comparisons of energy efficiency in the manufacturing industry. Department of Science, Technology and Society, Utrecht University, The Netherlands.
- Phylipsen, Blok, Worrell, & Beer, d. (2002). Benchmarking the energy efficiency of Dutch industry: an assessment of the expected effect on energy consumption and CO2 emissions. . *Energy Policy* 30 , 663-670.
- Phylipsen, Nyboer, Oliver, Pape, Worrell, & (eds.), B. (1996). Proceedings of the Workshop on Methodologies for International Comparisons of Industrial Energy Efficiency. . *Burnaby, BC: Simon Fraser University*.
- PLANTCockpit. (2010). *Production Logistics and Sustainability Cockpit*. Seventh Framework Program .
- Portioli Staudacher, A. (2011). Strategia delle Operations. In *Operations Strategy, Manufacturing Strategy*. Politecnico di Milano.
- Prabhu, V., & Taisch, M. (s.d.). imulation Modeling of Energy Dynamics in Discrete Manufacturing Systems. *Department of Management, Economics and Industrial Engineering, Politecnico di Milano, Milano, 20133 Italy*, draft version.
- Prindle. (2010). From shop floor to top floor: Best practices in energy efficiency. *Technical report, Pew Center on Global Climate Change*.
- Prindle. (2010). From shop floor to top floor: Best practices in energy efficiency. *Technical report, Pew Center on Global Climate Change*,.
- Pulcinelli. (2010). Effetto “rimbalzo”: maggiore efficienza energetica, maggiori emissioni. [http://www.arpa.umbria.it/resources/docs/micron%2016/MICRON\\_16\\_34.pdf](http://www.arpa.umbria.it/resources/docs/micron%2016/MICRON_16_34.pdf).
- Rahimifard, Seow, & Childs. (2010). Minimising embodied product energy to support energy efficient manufacturing. *CIRP Annals e Manufacturing Technologie* 59, 25-28.
- Rakar, & Zorzut. (s.d.). *Key Performance Indicators for Production Management*.
- Ramirez, Blok, Neelis, & Patel. (2006). Adding apples and oranges: The monitoring of energy efficiency in the Dutch food industry. *Energy Policy* 34 , 1720-1735.
- Ramírez, C. P. ( 2005). The non-energy intensive manufacturing sector: an energy analysis relating to the Netherlands. In *Energy* 30 (p. 749-767).
- Reich-Weiser, Vijayaraghavan, & Dornfeld. (2008). *Metrics for sustainable manufacturing*. *Technical report, UC Berkeley: Laboratory for Manufacturing and Sustainability*.
- Rey, L. B. (2002). ERP-Systeme und ihr Datenangebot für die Ressourceneffizienz-Rechnung. Ergebnisbericht aus dem Forschungsprojekt CARE. [http://www.wupperinst.org/uploads/tx\\_wiprojekt/care\\_kp2\\_2.pdf](http://www.wupperinst.org/uploads/tx_wiprojekt/care_kp2_2.pdf).



- Rockwell Automation, IManufacturing Execution Systems for Sustainability. Extending the Scope of MES to Achieve Energy Efficiency and Sustainability Goals. [http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/wp/sust-wp001\\_-en-p.pdf](http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/wp/sust-wp001_-en-p.pdf). (2009).
- Rohdin, T. (2006). Barriers to and driving forces for energy efficiency in the non-energy intensive manufacturing industry in Sweden. *Energy*, 31(12):1836–1844, 9.
- Ross, & Feng. (1991). The energy efficiency of the steel industry in China. *Energy* 16, 833-848.
- Rothenberg, Pil, & Maxwell. (2001). LEAN, GREEN, AND THE QUEST FOR SUPERIOR ENVIRONMENTAL PERFORMANCE. *PRODUCTION AND OPERATIONS MANAGEMENT*, Vol. 10, No. 3.
- SAP. (2010). Excelling at Enterprise Carbon Management and Sustainability- an Executive Business Framework for Sustainability 2.0. SAP White Paper.
- Sardianou, E. (2008). Barriers to industrial energy efficiency investments in Greece. *Journal of Cleaner Production* 16, 1416-1423.
- Sarwar. (1987). Performance and life testing of Hacksaw blades. *Proceedings of the IXth ICRP*. Cincinnati, USA.
- Sarwar, Persson, Hellbergh, & JulfikarHaider. (2009). Measurement of specific cutting energy for evaluating the efficiency of bandsawing different workpiece materials. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 49, 958-965.
- Schieferdecker. (2005). "Technische Tools im Industriellen Energiemanagement". *Springer Verlag*, 8-97.
- Schieferdecker, B. F. (2006). Energiemanagement-Tools: Anwendung im Industrieunternehmen, 1. Aufl. Berlin: Springer.
- Schipper, & Grubb. (2000). On the rebound? Feedback between energy intensities and energy uses in IEA countries. *Energy Policy* 28, 367-388.
- Slizyte, & Bakanauskiene. (2007). Designing performance measurement system in organization. *Journal of Business Logistic*.
- Spalding-Fecher. (2003). Indicators of sustainability for the energy sector: a South African case study. *Energy for Sustainable Development*, 7(1), 35-49.
- SPRU. (2000.). Reducing Barriers to Energy Efficiency in Public and Private Organizations Brighton, UK.
- Staniškis, & Arbačiauskas. (2009). Sustainability Performance Indicators for Industrial Enterprise Management. *Institute of Environmental Engineering, Kaunas University of Technology, Lithuania*.

- Stephens. (2001). Supply chain council & supply chain operations reference model overview, .  
*Supply Chain Council, Inc.*
- Sutherland, J. R. (2008). Challenges for the manufacturing enterprise to achieve sustainable development. In: M. Mitsuishi, K. Ueda, F. Kimura (Eds.), *Manufacturing Systems and Technologies for the New Frontier The 41st CIRP Conference on Manufacturing Systems*, (p. 15-18).
- Tanaka. (2008). Assessment of energy efficiency performance measures in industry and their application for policy. *Energy Policy* 36 , 2887-2902.
- The Climate Group, SMART 2020: Enabling the low carbon economy in the information age, [http://www.smart2020.org/\\_assets/files/02\\_Smart2020Report.pdf](http://www.smart2020.org/_assets/files/02_Smart2020Report.pdf). (2008).
- Thollander, Danestig, & Rohdin. (2007). Energy policies for increased industrial energy efficiency: Evaluation of a local energy programme for manufacturing SMEs. *Energy Policy*, 35 (11), 5774-5783.
- Thollander, P. &. (2010). Energy management practices in Swedish energy intensive industries. *Journal of Cleaner Production*, 18 (12), 1125-1133.
- Trenz, W. (2001.). Energiemanagement für mittelständische Unternehmen : rationeller Energieeinsatz in der Praxis : Arbeitsschritte, Planungshilfen, Lösungsbeispiele Cologne: Deutscher Wirtschaftsdienst.
- Turvey, & Norbay. (1965). 'On measuring energy consumption'. *Economic Journal* 75, 787-793.
- Tyteca. (2002). Business organisational response to environmental challenges : performance measurement and reporting. *Centre Entreprise - Environnement IAG School of Management, Université catholique de Louvain*.
- U. S., E. P. (2010). *U. S. Environmental Protection agency. Retrieved May 2010, from Greenhouse Gas Emissions - Climate change.*
- UCIMU. (s.d.). -*SISTEMI PER PRODURRE*. <http://www.ucimu.it/home/>.
- UN. (1988). *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate*.
- UNFCCC. (2010). *Report of the Conference of the Parties on Its Fifteenth Session, Held in Copenhagen from 7 to 19 December 2009 at Its Fifteenth Session. Part Two: Action Taken by the Conference of the Parties*.
- UNIDO. (2006). Report on Capacity in Energy Efficiency and Renewable Energy Regulation and Policy, Project no: YA/FRA/05/016.
- UNIDO. (2006b). Capacity Building in Energy Efficiency and Renewable Energy Regulation and Policy-Making in Africa, Ghana—Energy Efficiency Country Profile, Ofosu Ahenkorah, Accra.

- UNIDO. (2010). Energy efficiency technologies and benefits. *sustainable energy regulation and policymaking for africa*.
- UnitedStates, J. E. (1981). National Index [br Energy Productivity US Government, Washington,DC.
- Vallo, E. (2009). *Metodi di gestione della produzione per il miglioramento dell'efficienza energetica*. Politecnico di Milano, Ingegneria Gestionale.
- Van Gorp, J. C. (2005). Using key performance indicators to manage energy costs. *Strategic Planning for Energy and the Environment* 25(2), 9-25.
- van Schalkwyk, J. C. (1998). Total quality management and the performance measurement barrier. *The TQM Magazine, Vol. 10* , 124-131.
- VDI-Richtlinie4661. (2003). *"Energiekenngößen - Definitionen - Begriffe – Methodik"*. Beuth Verlag GmbH.
- Veleva, & Ellenbecker. (2001). Indicators of sustainable production: framework and methodology. *Journal of Cleaner Production* 9, 519-549.
- Venkat, & Wakeland. (2006). Is Lean Necessarily Green? *Proceedings of the 50th Annual Meeting of the ISSS, ISSS 2006 Papers*.
- Vera, & Langlois. (2007). Energy indicators for sustainable development. *Energy*, 32(6), 875 -882.
- Vodicka, Banik, & Bunse. (2009). Publ. 13. Research Streams in Energy Efficient. *Manufacturing. A Basis for Future Research Activities. Proceedings of the XIV Summer School "Francesco Turco" Impianti Industriali Meccanici. 15.-19. September 2009, Monopoli, Italy*.
- Vollmann. (1996). The transformation imperative: achieving market dominance through radical change. Boston, MA: Harvard Business School press.
- Wisner, & Fawcett. (1991). Link firm strategy to operating decisions through performance measurement. *Production and Inventory Management Journal, Third Quarter*, 5-11.
- Wohinz, M. (1989). *Betriebliches Energiemanagement : aktuelle Investition in die Zukunft Wien [etc.]*: Springer.
- Wu, Chen, Bor, & Wu, Y.-C. (2007). Structure model of energy efficiency indicators and applications . *Energy Policy* 35(7), 3768-3777.
- Yildirim, M. B. (2007). Operational methods for minimization of energy consumption of manufacturing equipment. Wichita State University: <http://soar.wichita.edu/dspace/handle/10057/3435>.
- Yongan, & Menghan. (2011). Research on Green Supply Chain Design for Automotive Industry Based on Green SCOR Model. *2011 International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering*.

## GLOSSARIO

CECIMO	Comité Européen de Coopération des Industries de la Machine Outil
CNC	Computer Numerical Control
DEE	Degree of Energy Efficiency
DSS	Decision Support System
EE	Energy Efficiency
EEM	Energy Efficiency in Manufacturing
EI	Energy Intensity
EM	Energy Management
Em	Energy meter
EnMS	Energy Management System
EnPI	Energy Performance Indicator
EP	Energy Performance
EPE	Energy Performance Evaluation
EPI	Energy Performance Index
EPis	Energy Performance Indicators
ERP	Enterprise Resource Planning
ES	Energy Saving
EST	Energia Specifica di Taglio
GHG	Green House Gas
KPI	Key Performance Indicator
ICT	Information and Communication Technology
ISP	Indicators of Sustainable Production
LCSP	Lowell Center for Sustainable Production

MES	Manufacturing Execution System
MOM	Manufacturing Operations Management
MPS	Master Production Schedule
MRR	Material Removal Rate
MS	Manufacturing System
OEE	Overall Equipment Effectiveness
OEEE	Overall Equipment Energetic Effectiveness
PM	Performance Measurement
PMS	Performance Measurement System
PRM	Process Reference Model
RO	Research Objective
RQ	Research Question
SC	Supply Chain
SCE	Specific Cutting Energy
SCADA	System Control And Data Acquisition
SEC	Specific Energy Consumption
SI	Sistema Informativo
TEEP	Total Effective Equipment Performance
TEEEP	Total Effective Equipment Energy Performance
TBL	Triple Bottom Line
TBS	Technical Building Services
WIP	Work In Progress

## APPENDICE A

### Classificazione delle *Reference*

Le fonti citate nel corso della trattazione e inserite nella *Bibliografia*<sup>72</sup> sono ora classificate sulla base di dimensioni sviluppate *ad hoc* per poterne comprendere il contributo apportato nella trattazione. In particolare:

- La particolare sezione della trattazione per la quale la fonte (rappresentata dalla singola riga della matrice) ha apportato un contributo viene rappresentato attraverso la dimensione "dim  $i$ " ( $1 \leq i \leq 5$ ) che costituisce la singola colonna della matrice;
- La rilevanza del contributo apportato dalla fonte per un certo capitolo o una particolare sezione è invece rappresentata nella cella della matrice attraverso un pallino in scala di grigi. Un colore più scuro è indice dell'importanza del contributo apportato dalla fonte.

Le dimensioni in colonna sono così definite:

Dim 1: Letteratura funzionale all'individuazione del research focus

Dim 2 Letteratura di background teorico

Dim 3: Letteratura funzionale alla definizione dello stato dell'arte dei KPI di EE

Dim 4: Letteratura funzionale alla definizione della gap analysis

Dim 5: Letteratura a supporto dello sviluppo della metodologia proposta

I pallini con i quali si definisce il contenuto delle celle interessate sono invece definiti secondo un criterio che bilancia qualità e quantità delle informazioni apportate:

- Pallino bianco - contributo marginale: poche informazioni apportate, non particolarmente determinanti
- Pallino grigio - modesto contributo: alcune informazioni apportate di modesta rilevanza
- Pallino nero - contributo apportato determinante: molte informazioni e/o informazioni di portata rilevante.

E' chiaro che ogni fonte può essere associata anche a colonne diverse attraverso pallini di diverso colore, in funzione dell'entità del contributo apportato.

---

<sup>72</sup> Non sono comprese esaustivamente tutte le citazioni fatte, dal momento che alcune di esse sono a loro volta riportate da paper di altri autori.

Reference	Dim 1	Dim 2	Dim 3	Dim 4	Dim 5
(Ang, 2006)			○	○	
(Artley, Ellison e Kennedy, 2001)		●			●
(Audzeyeva, 2010)		○			
(Azapagic & Perdan, 2000)	○				
(Berrah & Cliville, 2007)					○
Bonneschky (2005)			○		
(Bourne, 1999)					○
(Bourne, Mills, Wilcox, Neely, & Platts, 2000)		○			
(Boyd, Dutrow, & Tunnessen, 2008)			○		
(Braglia, Zanoni, & Zavanella, 2003)				○	
(Brandolese & Garetti, 1981)					○
(Bunse, 2011)	●				
(Bunse, Vodicka, Schönsleben, Brühlhart, & Ernst, 2011)				●	
(Bunse & Vodicka, 2010)		○			
(Bunse & Vodicka, 2011)		●			
(Calabrese, 2004)	○				
(Cannata, 2011)		○	●		○
(CECIMO)					○
Chryssolouris (2006)		○			
(EC, 2008)	○				
(EC, 2006)	○				
(Erlach, 2010)		○			
(Dahmus & Gutowski, 2004)					●
(DeCanio S. W., 1998)	○				
(Dietmar & Verl, 2008)					●
(Diakaki C., 2006)		○			
(Dixon, Nanni, & Vollmann, 1990)		○			
(EEA, 2010)	●				
(EIA, 2010)	○				
(Eichhammer W. , 2004)	○				
(Doran, 1981)		○			
(Farla, Blok, & Schipper, 1997)		○			
(Frauenhofer-Gesellschaft, 2008)				○	
(Furlanetto, Garetti, & Macchi)					○
(Garetti & Taisch, 1995)					○
(Glavick & Lukman, 2007)	○				
(Grando & Turco, 2005)					●
Gunasekarana, Patelb, & McGaugheyc (2004),					●
(GRI, 2006)			○		
(Groot, 2011)	○				
(Gutowski, Dahmus, & Thiriez,					●

2006)					
(Hendrik & Verfaillie, 2000)			○		
(Kannan & Boie, 2003)				●	
(IEA, 2004)			●		
(IEA, 2008)	●				
(IEA, 2008b)	○				
(IEA, 2007)	○				
(IEA, 2010)	○				
(IEC, 2003)			●		
(IMS2020)	●				
(Ishikuma, 2011)	●				
(ISO14.031, 1998)			○		○
(ISO 50001:2011)		○			
(Irrek & Thomas, 2008)			○		
(ISA-95, 2006)			●		●
ITIA-CNR (2011)			○		
(Joint Economic Committee of the Congress of the United States, 1981)			○		
(Karnouskos, Colombo, Lastra, & Popescu, 2009)				●	
(KPI Library)			●		
(Lamontagne, Kusik, Benson, & Wright, 2000)					○
(LBNL, 2007)			○		
(Lingle & Schiemann, 1996)		○			
Logistic Management Institute (2003)					●
(Mazzarino et. al, 2008)					●
(McMann & Nanni, 1994)		○			
(McKinsey Deutschland, 2009)	○				
(Morthorst, 2001)	○				
(Morvay & Gvozdenac, 2008)		○			●
(Muchiri & Pintelon, 2008)					●
(Müller, Engelmann, Löffler, & Strauch, 2009)			○		
(Muñoz-Lopez, 2010)				●	
(Najmi, Rigas, & Fan., 2005)		○			
(Nakajima, 1988 )					●
(Neely, Mills, Gregory, & Platts, 1995)		○		●	
(Neely, 1999)		○			
(O'Callaghan, 1977)	●	○			
(Patterson, 1996)		●	●		
(Phylipsen, Blok, & Worrell, 1998)		○			
(Phylipsen, Blok, Worrell, & Beer, 2002)		○			
(Prindle, 2010)			○		

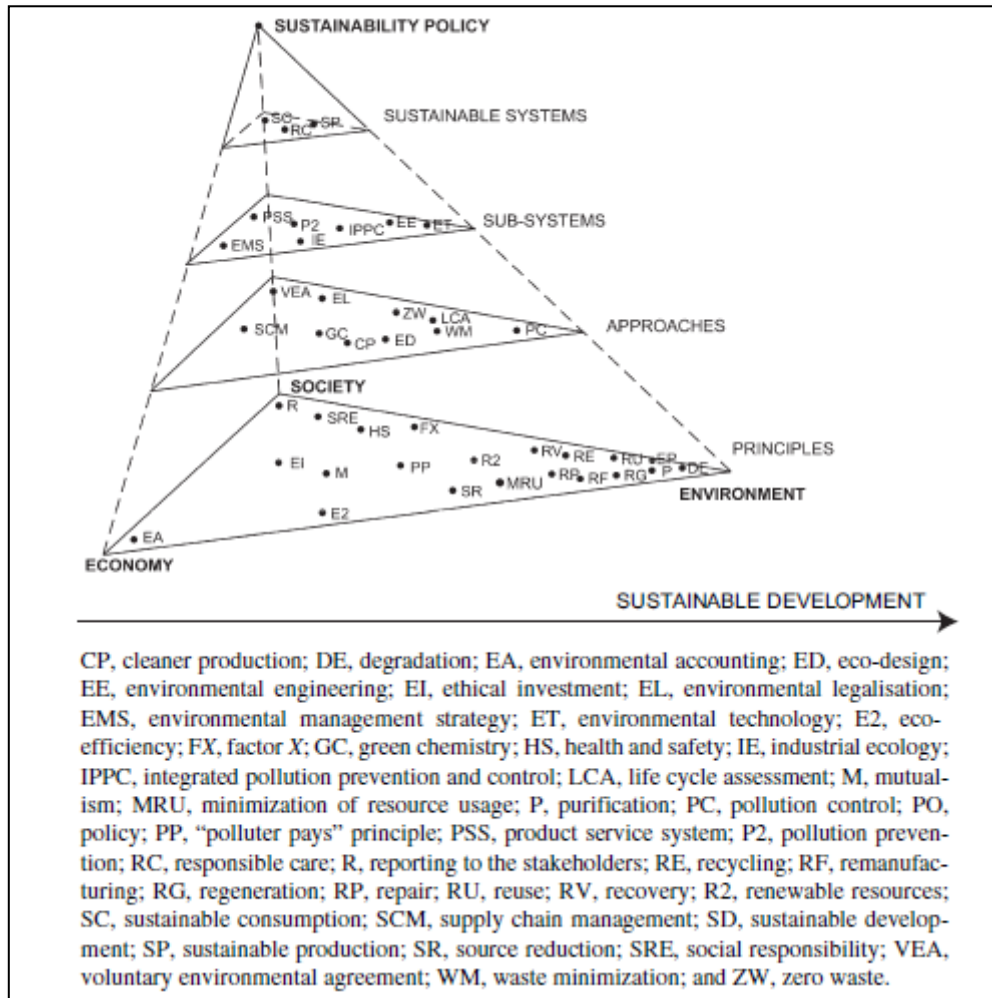


(Pulcinelli, 2010)		○			
(Rahimifard, Seow, & Childs, 2010)				●	
Reich-Weiser et al. (2008)			●		
(Rohdin, 2006)	●				
(SAP, 2010)		○			
(Schieferdecker B. F., 2006)			●		
(Schipper e Grubb, 2000)		○	○		
(Slizyte & Bakauskiene, 2007)		○			●
(Spalding-Fecher, 2003)		○			
(SPRU, 2000)	○				
(Stephens, 2001)					●
Supply Chain Council					●
(Sutherland, 2008)	○				
(Tanaka, 2008)			○		
(The Climate Group, 2008)		○			
(Tyteca, 2002)			○		
(Thollander P. &, 2010)		c			
(Vallo, 2009)					●
(Van Gorp, 2005)			○		
VDI-Richtlinie4661. (2003)			●		
(Veleva & Ellenbecker, 2001)			○	●	
(UCIMU)					●
(UNFCCC, 2010)	○				
Wohinz and Moor, 1989)		○			
(Wanke and Trenz, 2001)		○			
(UNIDO, 2010)	●				
(U.S Energy Information Administration, 2011)	○				
(Yildirim, 2007)					●
(Yongan & Menghan, 2011)					●

# APPENDICE B

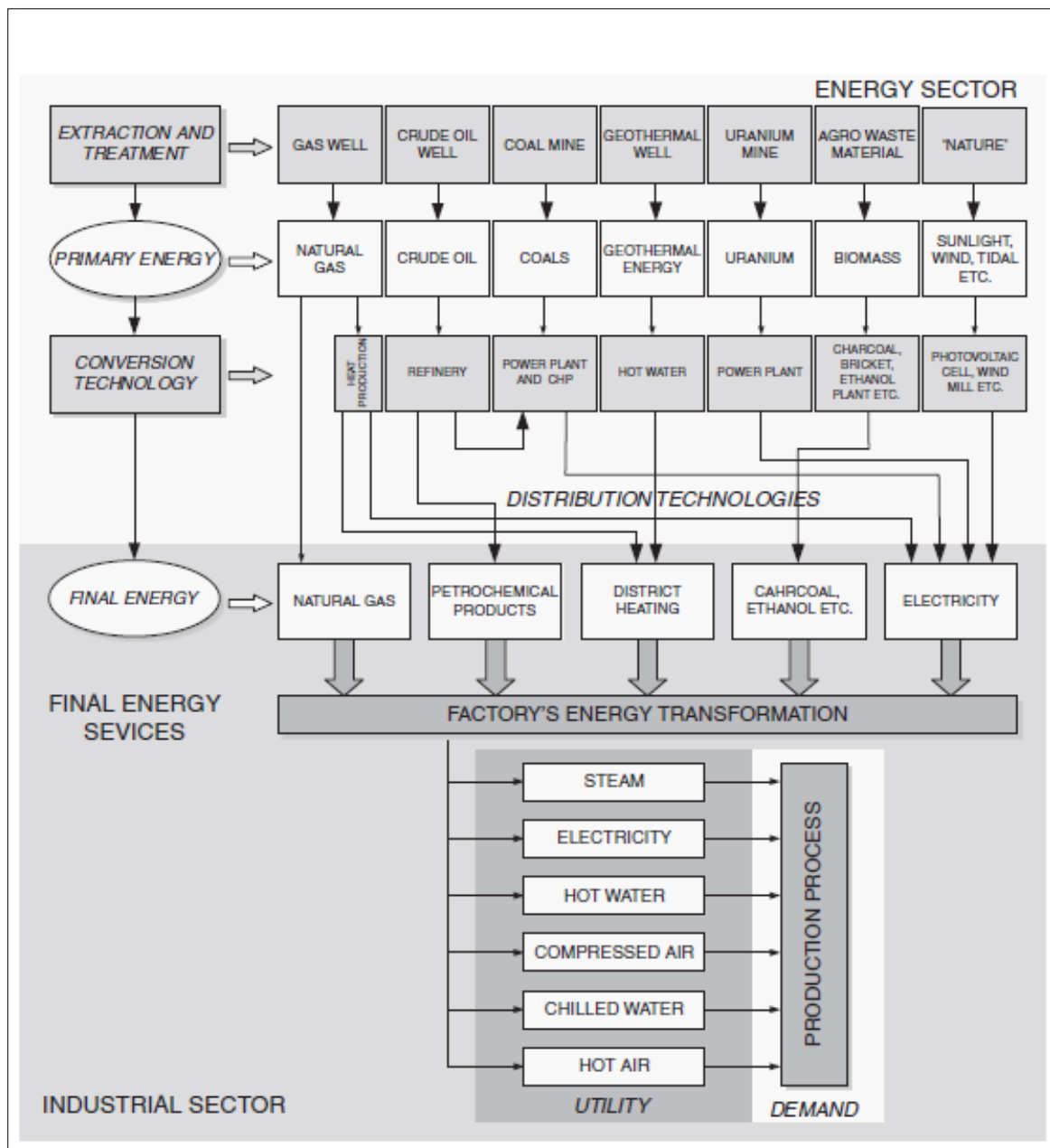
## Figure /Tabelle di supporto

Classification of sustainability oriented terms



Allegato 1: Classification of sustainability oriented terms. Fonte: Glavick & Lukman, 2007.

Energy Conversion Steps from Primary Energy to End-Users



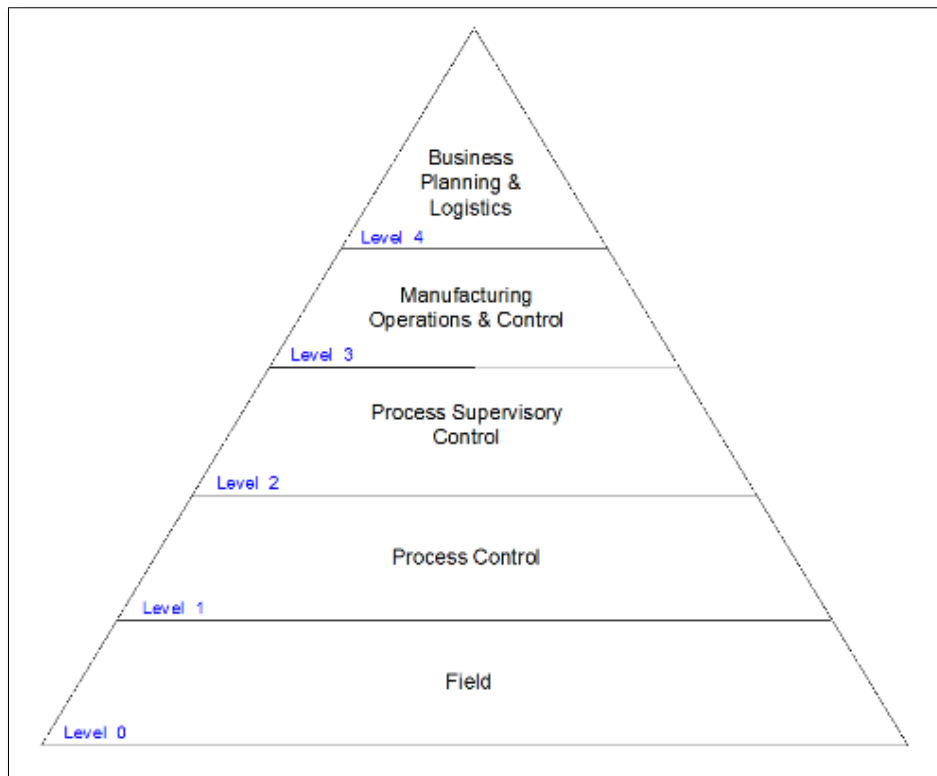
Allegato 2: Energy Conversion Steps from Primary Energy to End-Users. Fonte: Morvay & Gvozdenac, 2008.

Comparison between standards: ISO 50001: 2009 Energy Management e EN 16001: 2009 Energy Management

Comparison between standards	
ISO 50001:2009 Energy Management (draft version)	EN 16001:2009 Energy Management
4.1 General requirements	3.1 General requirements
4.2 Management Responsibility	3.4.1 Structure and responsibility
4.2.1 Commitment of top management	
4.2.2 Roles, responsibility and authority	
4.3 Energy policy	3.2 Energy policy
4.4 Planning	
4.4.1 General	
4.4.2 Energy profile	3.3.1 Energy aspects
4.4.3 Energy Baseline	3.3.1 Energy aspects
4.4.4 Energy performance indicators	3.3.1 Energy aspects
4.4.5 Legal and other requirements	3.3.2 Legal and other requirements
4.4.6 Objectives, targets and action plans	3.3.3 Objectives, targets and programme(s)
4.5 Implementation and operation	
4.5.1 Competence, training and awareness	3.4.2 Training, awareness and competence
4.5.2 Documentation	3.4.4 Energy mgmt sys. documentation
4.5.2.1 Documentation requirements	3.4.4 Energy mgmt sys. documentation
4.5.2.2 Control of documents	3.4.5 Document control
4.5.3 Operational control	3.4.6 Operational control
4.5.4 Communication	3.4.3 Communication
4.5.5 Design	3.4.6 Operational control
4.5.6 Purchasing energy services, goods and energy	3.4.6 Operational control
4.5.6.1 Purchasing of energy services and goods	3.4.6 Operational control
4.5.6.2 Purchasing of energy	3.4.6 Operational control
4.6 Checking performance	
4.6.1 Monitoring, measurement and analysis	3.5.1 Monitoring and measurement
4.6.2 Evaluation of legal/other compliances	3.5.2 Evaluation of compliance
4.6.3 Internal audit	3.5.5 Energy management system audit
4.6.4 Nonconformities, corrective, preventive and Improvement actions	3.5.3 Non-conf., corrective/preventive action
4.6.4.1 Nonconformities	
4.6.4.2 Corrective and preventive actions	
4.6.5 Control of records	3.5.4 Control of records
4.7 Review of the energy management system by top management	3.6 Energy Management Review
4.7.1 Inputs to management review	
4.7.2 Outputs from management review	

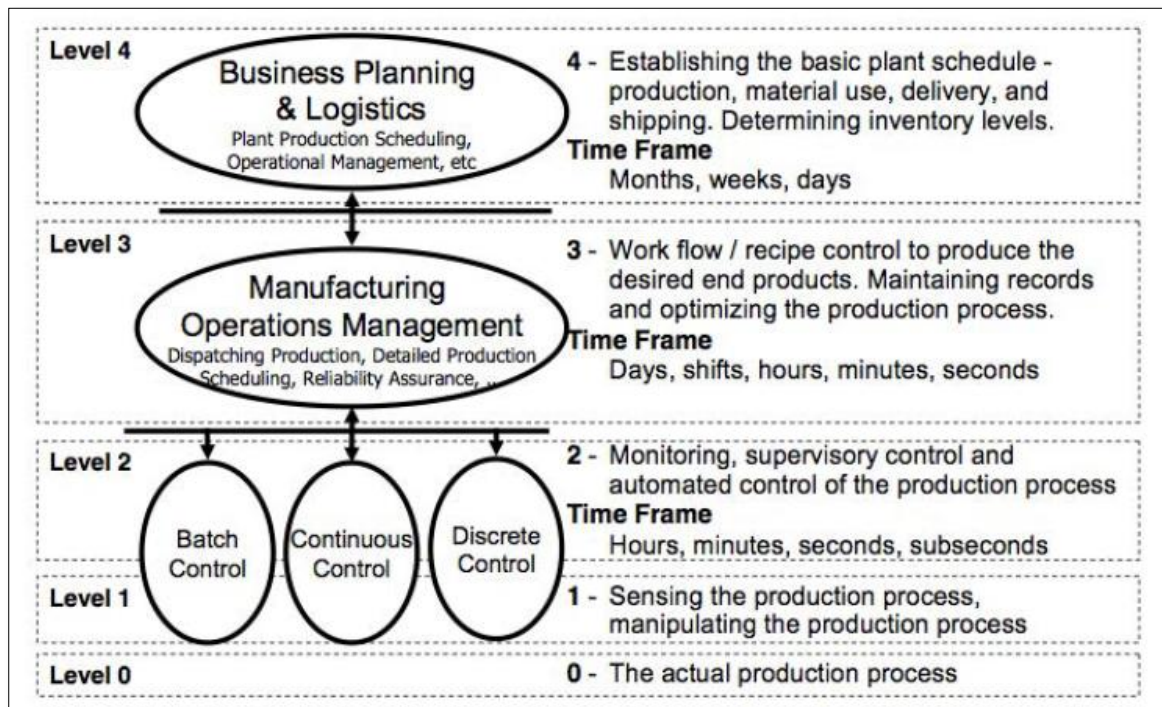
Allegato 3: Comparison between standards: ISO 50001: 2009 Energy Management e EN 16001: 2009 Energy Management.

ISA-95 Levels: Activity Model



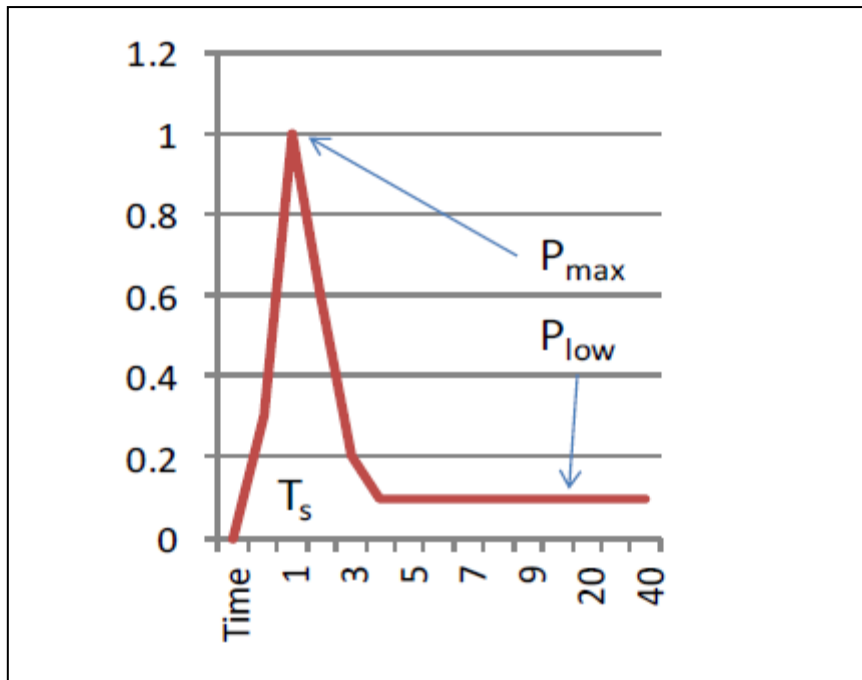
Allegato 4: ISA-95 levels: Activity Model. Fonte:

ISA-95: Functional Hierarchy Model



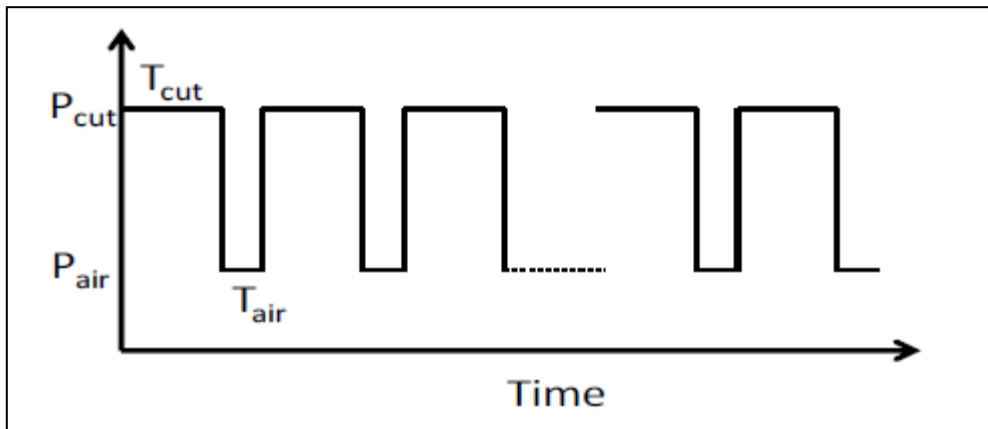
Allegato 5: ISA-95:Multi-level functional hierarchy of activities. Fonte: ISA-95, from Figure 2 in IEC 62264-3.

Power signature of spindle on in the ramp up state.



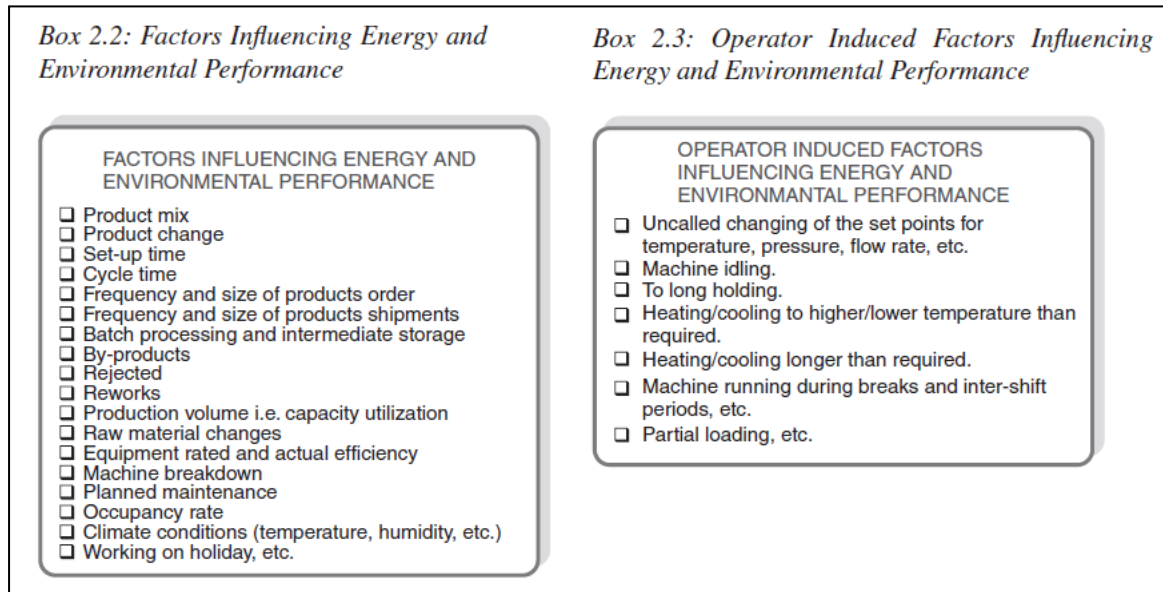
Allegato 6: Power signature of spindle on in the ramp up state. Fonte: Prabhu & Taisch, Simulation Modeling of Energy Dynamics in Discrete Manufacturing Systems, -in corso-.

Power signature of milling in the processing state.



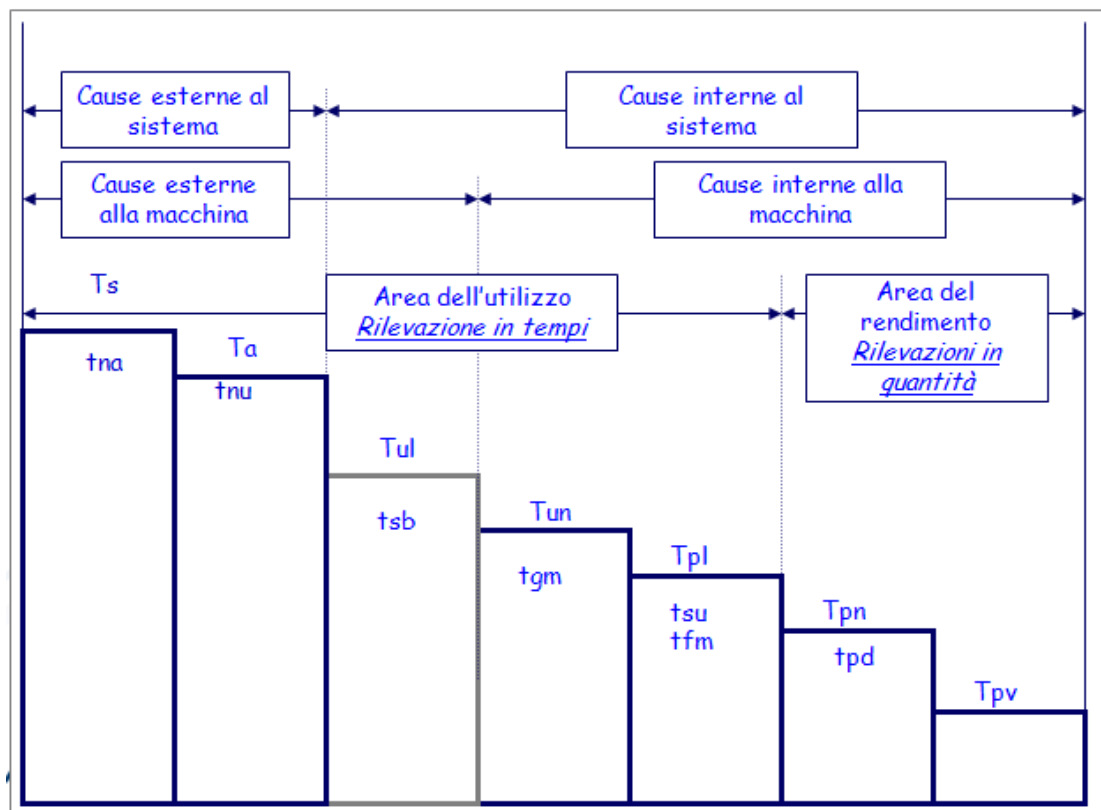
Allegato 7: Fonte: Prabhu & Taisch, Simulation Modeling of Energy Dynamics in Discrete Manufacturing Systems, -in corso-.

Factors influencing energy and environmental performance & Operator Induced factors influencing energy and environmental performance



Allegato 8: Factors influencing energy and environmental performance Fonte: Morvay & Gvozdenac, Applied industrial energy and environmental management (2008).

Diagramma dello stato dell'impianto



Allegato 9: Diagramma dello stato dell'impianto. Fonte: Grando & Trucco, 2005.

## APPENDICE C

### Intervista semi strutturata utilizzata per la validazione qualitativa della metodologia

#### Contesto aziendale

- 1) Qual è il portafoglio di offerta dell'azienda all'interno della produzione discreta?  
Lo può classificare attraverso il template sviluppato all'interno della trattazione?
- 2) Quanto è ampio il range delle lavorazioni dei cicli tecnologici relativi alla realizzazione dei diversi prodotti del portafoglio? Essi sono eterogenei in termini di consumo energetico e impatto ambientale?
- 3) Che tipo di KPI di EE esistono all'interno dei vostri report di sostenibilità?

#### Scenario settoriale

- 4) Quale è lo stato dell'arte dei programmi/iniziative rivolte ad un miglioramento delle performance di EE tramite KPI?
- 5) Quale è lo stato dell'arte delle tecnologie di sensoristica di controllo e di monitoraggio?
- 6) Qual è al momento lo stato di diffusione delle nuove figure di energy manager?

#### Progettazione della metodologia

- 7) Sulla base della sua esperienza, i risultati della *gap analysis* ottenuta attraverso l'investigazione nella letteratura è allineata rispetto ai gap effettivamente presenti nella realtà aziendale?  
Esistono ulteriori esigenze -latenti o realmente percepite- all'interno della realtà aziendale in relazione al research topic della trattazione?
- 8) La metodologia generale risulta chiara in termini di passaggi logici tra una sua fase e la successiva? Sarebbe dunque facilmente comprensibile e implementabile in una realtà aziendale?



- 9) Gli stati energetici e gli stati manifatturieri individuati nel caso della macchina utensili risultano corretti ed esaustivi in relazione agli scopi della metodologia cross-view e al livello di dettaglio sul quale si basa?

#### Implementazione della metodologia

- 10) Quali punti di forza –sia tecnologici che gestionali- riesce ad identificare nella metodologia proposta? Quali sono i benefici in termini di *triple bottom line* (economici, ambientali, sociali)?
- 11) Quali punti di debolezza –sia tecnologici che gestionali- riesce ad identificare nella metodologia proposta?
- 12) Quali sono i driver<sup>73</sup> –sia tecnologici che gestionali -che impattano maggiormente sul successo (o insuccesso) dell'adozione di questa metodologia in una realtà aziendale manifatturiera?
- 13) Quale l'orizzonte temporale (di breve termine, medio termine o lungo termine) stima per un utilizzo completo della metodologia da parte di una scala sufficientemente ampia di stabilimenti produttivi del Manufacturing? Di quanto si ridurrebbe l'orizzonte temporale stimato nel caso di un utilizzo ridotto?

---

<sup>73</sup> I driver di successo possono essere indicati con il nome di "fattori abilitanti", mentre i driver di insuccesso possono essere indicati con il nome di "barriere".

