



POLITECNICO DI MILANO
SCUOLA DI INGEGNERIA INDUSTRIALE E DELL'INFORMAZIONE

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN
INGEGNERIA ENERGETICA

**VALUTAZIONE
ENERGETICA E AMBIENTALE
DI INTERVENTI DI
EFFICIENTAMENTO ENERGETICO**

Tesi di Laurea di:
Giorgio Di Blasio

Relatore:
Prof. Emanuela Colombo

Correlatore:
Matteo V. Rocco

Anno Accademico 2015-1016

Ringraziamenti

Giunto all'ultimo tornante di questa salita, sono molte le persone che meritano di essere ringraziate.

Mia madre e mio padre, per il sostegno continuo e gli incoraggiamenti, dal primo giorno al Politecnico, con la corsa in autostrada, fino ad oggi.

Mia nonna, che ha praticamente iniziato a farmi studiare e mi ha accompagnato fino in fondo.

Gli altri nonni che si sono persi questo momento e gli zii che da sempre mi supportano, facendomi sentire come un figlio loro.

Tra le numerose persone incontrate nella mia carriera di studente mi ritengo davvero fortunato di aver lavorato con la Professoressa Colombo, esempio di impegno, competenza e apertura al dialogo.

Un ringraziamento enorme a Matteo, sapiente guida in questi mesi di tesi; penso sinceramente che il mondo sarebbe migliore se lavorassimo tutti con l'impegno, la serietà e la comprensione che mi hai dimostrato in questi mesi.

Infine, grazie ai miei tre compagni di battaglie, Leo, Heinz e Moro.

Agli altri amici e amiche marchigiani, ai ragazzi del basket, ai compagni degli aperitivi e di tutto quello che c'è stato in questi anni, al di fuori del Politecnico. Sarebbe troppo lungo elencarvi tutti perché siete stati davvero tanti.

Grazie al mio ottimismo che, nonostante tutto, non mi ha mai abbandonato.

E grazie a te, Arianna, che in ogni momento difficile sei la mia forza, il mio sostegno e la mia motivazione.

Giorgio

Riassunto esteso

Esaminando il contesto internazionale in ambito energetico e ambientale, emerge una forte attenzione nei riguardi dello sfruttamento delle risorse fossili e delle problematiche ambientali, testimoniato anche dai recenti accordi del COP21 di Parigi. Gli Stati aderenti hanno fissato ambiziosi obiettivi da raggiungere nei prossimi decenni, impegnandosi nell'attuazione di politiche consapevoli dal punto di vista ambientale.

Come dimostrano i dati pubblicati dall'International Energy Agency (IEA) ed il pacchetto *Clima - Energia (20-20-20)* ratificato dall'Unione Europea, l'efficienza energetica gioca un ruolo cruciale nel raggiungimento degli obiettivi proposti. Non soltanto è intesa come un obiettivo - la riduzione del 20% dei consumi energetici primari rispetto alla proiezione al 2020 - ma anche come uno strumento: attraverso di essa vengono ridotti i consumi energetici e, conseguentemente, limitati gli impatti ambientali legati allo sfruttamento dei combustibili fossili. Non a caso, secondo dati della IEA, la maggior parte delle emissioni di gas serra annualmente evitate è attribuibile a pratiche di efficientamento energetico, seguite dalla diffusione di tecnologie per la produzione elettrica da fonti rinnovabili.

Molte nazioni hanno implementato, ormai da anni, strumenti incentivanti per promuovere l'efficienza energetica, confidando su di essi per raggiungere gli obiettivi internazionali stabiliti. E', ad esempio, il caso dell'Italia in cui dal 2005 è in vigore il meccanismo dei *Certificati Bianchi* che remunera i risparmi di energia primaria tramite l'emissione di *Titoli di Efficienza Energetica* (TEE). Nel contesto italiano lo schema dei *Certificati Bianchi* è importante perché, attraverso il D.M. 28/12/12, stabilisce le metodologie correntemente utilizzate per la quantificazione dei risparmi energetici conseguiti attraverso interventi di efficientamento alle utenze finali.

Nel secondo capitolo del presente lavoro viene esaminato in modo critico il meccanismo italiano al fine di:

- Mettere in luce le metodologie di calcolo del risparmio energetico utilizzate dal GSE;
- Comprendere le ipotesi sottostanti alla quantificazione dei risparmi;
- Capire quale criterio indirizza un proponente a scegliere i progetti di efficientamento da realizzare.

Da un'attenta analisi del sistema valutativo attuale emerge che alcuni aspetti relativi all'intervento implementato non vengono analizzati: la valutazione della fase di realizzazione del progetto e di altre categorie di impatto ambientale potrebbero risultare non trascurabili al fine di quantificare il reale beneficio ambientale del paese.

Infatti, per conciliare al meglio gli aspetti energetici ed ambientali, come suggerito dagli ambiziosi obiettivi internazionali, la comunità scientifica è chiamata a rispondere all'esigenza di valutazioni di impatto ambientale sempre più complete.

E' con questo scopo che, negli ultimi decenni, sono stati sviluppati gli strumenti di *analisi del ciclo di vita (LCA)*. Attraverso di essi è possibile quantificare l'impatto ambientale globale di beni e servizi, includendo nell'analisi filiere produttive e diverse fasi della vita utile degli stessi.

Il contributo innovativo di questa tesi risiede, dunque, nell'adattamento dell'*analisi del ciclo di vita* al contesto dell'efficienza energetica. L'obiettivo generale dell'*LCA* è la valutazione dell'impatto ambientale. Di conseguenza, nella presente ricerca, si intende valutare l'impatto ambientale associato alla fase di realizzazione e alla fase operativa del progetto di efficientamento energetico.

Tra le finalità ufficialmente riconosciute della *LCA* si possono annoverare lo sviluppo e miglioramento del prodotto e l'implementazione di politiche pubbliche; nell'utilizzo di strumenti valutativi di tipo *LCA* su interventi di efficientamento energetico, entrambe queste applicazioni vengono perseguite.

Nel terzo capitolo viene presentato lo stato dell'arte del modello di *LCA* individuato: lo strumento computazionale adottato per la conduzione dell'*analisi di ciclo di vita* è l'*Analisi Input - Output (IOA)*. Il suo modello analitico, sviluppato nel XX secolo da Wassily Leontief e ormai consolidato in letteratura, consente di analizzare le interdipendenze settoriali all'interno di un determinato sistema economico, al fine di valutare il *costo* della produzione finale.

L'estensione ambientale della metodologia *IOA* consente di condurre valutazioni di tipo ambientale a partire dal consumo di combustibili fossili, di altre risorse primarie e dalle emissioni inquinanti in atmosfera, relativi ad ogni processo economico di cui il sistema si compone.

Nelle applicazioni pratiche, la *IOA* viene espressa in unità monetarie e riferita alle economie nazionali (*MIOT*): questo approccio gode di uno standard di accounting internazionalmente riconosciuto e di database aggiornati. Tuttavia, i risultati possono essere distorti a causa del metodo di trattamento dei flussi commerciali tra le economie nazionali. Per questo motivo sono stati sviluppati in letteratura modelli *IOA multiregionali*, i quali includono all'interno del medesimo *database* molteplici nazioni ed i flussi di beni e servizi scambiati tra di esse.

La struttura matematica della *IOA* e, nello specifico, della *MIOT* si presta ad una ulteriore variazione: da un settore economico può venire disaggregato un sottosistema, del quale si intende valutare l'impatto ambientale con maggior grado di dettaglio. Questo modello viene chiamato *analisi Input - Output ibrida*.

Il modello formalizzato nel quarto capitolo di questa tesi per lo studio dell'efficienza energetica sfrutta tutte le caratteristiche della *IOA* presentate allo stato dell'arte. Pertanto, partendo dal *World Input - Output Database (WIOD)* aggiornato al 2010, viene impostato un modello multiregionale ibrido su scala mondiale (*H-WIOT*).

L'intervento di efficientamento energetico costituisce l'*unità funzionale* della *LCA* e viene incluso nel *H-WIOT* come sistema disaggregato con le seguenti caratteristiche:

- E' composto di una fase di realizzazione ed una fase operativa;
- Appartiene al settore di distribuzione dell'energia italiano;
- Richiede beni e servizi dal sistema economico nazionale per produrre la propria domanda finale;
- La propria domanda finale è un'energia risparmiata, che dunque non deve più essere prodotta come domanda finale dal settore energetico;
- La domanda finale che viene inserita nel modello è quantificata a priori coerentemente con le metodologie valutative correnti.

Tramite l'estensione ambientale della IOA ed il modello di Leontief è possibile quantificare l'impatto ambientale totale relativo alla domanda finale del sistema disaggregato, in modo analogo a quanto viene fatto per le attività economiche e per i loro prodotti. In questo modo si valuta la fase di realizzazione dell'intervento e si raggiunge il *primo obiettivo* della ricerca.

Gli indicatori d'impatto selezionati tra quelli contemplati nel WIOD sono:

- Consumo di combustibili fossili (carbone, petrolio, gas naturale);
- Emissioni di gas serra (CO₂);
- Emissioni di gas acidificanti (NO_x, SO_x);
- Consumo di acqua;
- Manodopera e ore di lavoro.

Gli indicatori di tipo sociale non sono comunemente inclusi in valutazioni ambientali LCA, tuttavia, essendo disponibile il database aggiornato, si è scelto di includerli per dare una maggiore completezza all'analisi e per comprendere quanto possano essere efficaci nella valutazione sistemica dell'efficienza energetica.

Il *secondo obiettivo* del presente lavoro è la valutazione dell'impatto ambientale annualmente evitato dall'implementazione dell'intervento di efficientamento energetico. Questo viene quantificato tramite l'analisi dello *shock* di domanda finale - che corrisponde all'efficienza energetica conseguita -, riconosciuta in letteratura come una delle potenzialità dell'analisi *Input - Output*.

Il *terzo obiettivo* della ricerca è la quantificazione del bilancio ambientale netto al termine della vita utile del progetto e viene raggiunto mantenendo la coerenza con il quadro normativo italiano in materia di efficienza. Infatti, ogni intervento è caratterizzato da una vita utile e da un tasso di decadimento della prestazione energetica stabiliti dal GSE.

Considerando l'intera vita utile della tecnologia installata, si assiste a:

- Un impatto ambientale iniziale associato alla fase di realizzazione dell'intervento, valutato attraverso il modello *H-WIOT*;
- Un beneficio ambientale annuale lungo l'intera fase operativa dell'intervento, valutato attraverso l'analisi dello *shock* di domanda.

Dal contributo complessivo di queste due componenti è possibile quantificare un bilancio ambientale netto a fine vita utile. Anche in questo caso l'impatto è misurato in funzione dei diversi indicatori ambientali scelti.

Le maggiori differenze tra l'approccio LCA proposto e le metodologie correnti sono le seguenti:

- Viene introdotta la fase di realizzazione dell'intervento di efficientamento energetico, della quale viene valutato l'impatto ambientale totale;
- Lo *shock* di domanda finale sul settore energetico genera un risparmio energetico per il paese superiore allo *shock* stesso, poiché l'approccio LCA include nell'analisi l'intera filiera produttiva del settore di riferimento;

- Nella normativa italiana sui *Certificati Bianchi*, l'aggettivo “netto” sta ad indicare un miglioramento di efficienza rispetto ad un riferimento tecnologico o di mercato, mentre attraverso l'approccio proposto la qualità di “netto” indica l'aver considerato nel bilancio energetico complessivo l'energia primaria richiesta per realizzare l'intervento.

Il modello *LCA* proposto viene applicato a 15 interventi di efficientamento energetico, inventariati nelle Schede Tecniche Standard del meccanismo dei *Certificati Bianchi*. Nella scelta degli interventi concorrono motivazioni riguardo i costi di investimento a disposizione, le condizioni al contorno che influiscono sul risparmio generato e la reale diffusione di tali interventi nel panorama italiano. Tutti gli interventi analizzati sono teoricamente implementabili.

L'impatto ambientale totale, quantificato dal modello *H-WIOT* per la fase di realizzazione dell'intervento, mette in luce il differente impatto specifico delle attività economiche italiane: interventi simili per investimento economico iniziale possono risultare differenti per dispendio di risorse primarie o emissioni generate, a causa delle attività coinvolte nella filiera produttiva.

L'impatto ambientale iniziale va a gravare sul saldo ambientale netto conseguito al termine della fase operativa e da ciò emerge la necessità di una sua corretta valutazione.

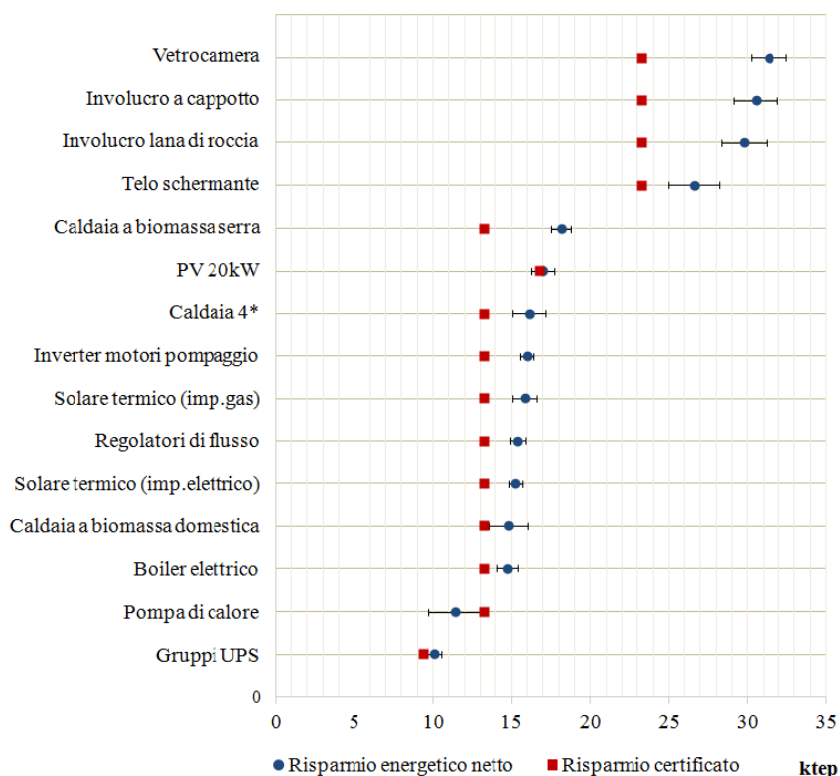


Figura A. Confronto tra risparmio energetico netto e risparmio energetico certificato dal GSE per gli interventi di efficientamento energetico analizzati.

In conclusione, i risultati ottenuti a fine vita utile - da un punto di vista energetico - si discostano, a seconda dell'intervento analizzato, in maniera più o meno marcata dalla quantificazione del risparmio secondo la metodologia corrente. In particolare, come si evince dalla Figura A, risulta che quest'ultima generalmente sottostimi la reale energia risparmiata dal sistema paese, valutata in ottica *LCA*. Tuttavia è confortante che il modello valutativo proposto, pur presentando alcune differenze di metodo, non fornisca risultati in netto contrasto rispetto alla tecnica ufficialmente riconosciuta da anni.

D'altra parte, la valutazione della fase di realizzazione dell'intervento e dell'impatto ambientale in termini di emissioni e di risorsa idrica consumata risulta essere un valore aggiunto rispetto alla metodologia corrente.

Extended summary

Examining international context in the field of energy and environment, there is a strong focus towards exploitation of fossil fuels and environmental issues, also demonstrated by recent agreements in Paris COP21. States parties have set ambitious goals to be achieved over next decades, engaging in environmentally conscious policies.

According to *International Energy Agency* (IEA) data and *2020 Climate & Energy package* energy efficiency plays a crucial role in the proposed objectives. It is intended as a goal - 20% reduction of primary energy consumption with respect to 2020 forecast - but also as a mean: through energy efficiency is possible to reduce energy consumption and, as a consequence, to limit environmental impacts due to fossil fuels exploitation and combustion. In fact, according to IEA data, most of greenhouse gas yearly avoided emissions is attributable to energy efficiency practices, followed by the spread of electricity production from renewable sources technologies.

Many nations have implemented instruments to promote energy efficiency, relying on them to achieve established international targets. For example Italy created the *Certificati Bianchi* mechanism since 2005: it rewards energy savings through energy efficiency stock (TEE). *Certificati Bianchi* scheme is important within Italian context because, through D.M 28/12/12, set methodologies currently used for energy savings assessment.

In the second chapter of this thesis will be critically examined the Italian mechanism in order to:

- Highlight energy savings calculation methodologies, used by GSE;
- Understand the underlying assumptions to the quantification of savings;
- Understand what driver addresses the proponent in choosing among efficiency projects.

From a careful analysis of current evaluation system will come to light that some implemented intervention features are neglected: production phase evaluation, such as other impact categories, should be accounted in order to quantify real net environmental benefit for the country.

In fact, in order to merge energy and environmental aspects, as suggested by international goals, scientific community is called to respond to the need for an as more comprehensive as possible environmental impact assessment.

In recent decades, *Life Cycle Assessment* (LCA) tools have been developed with this purpose. Through them it is possible to quantify the overall environmental impact of goods and services, including supply chains and different stages of life into the analysis.

Therefore the innovative contribution of this thesis is the adaptation of *Life Cycle Assessment* to the context of energy efficiency. *Life Cycle Assessment* general objective is environmental impact evaluation. Therefore, in this research, it will be assessed total environmental impact of energy efficiency interventions production and operational phases.

Among the officially recognized purposes of *LCA* there are product development and improvement and public policy making: in *LCA* application to energy efficiency interventions both of these are pursued.

Third chapter introduces *LCA* state of the art. The adopted computational tool of *Life Cycle Assessment* is the *Input - Output Analysis (IOA)*. Its analytical structure, developed in the 20th century by Wassily Leontief and well established in literature, analyzes sectoral interconnections within a given economic system, in order to evaluate final production embodied cost.

Environmental methodology extension allows to conduct *IOA* environmental assessments of each economic process within the system, starting from the consumption of fossil fuels, other primary resources or pollutant emissions into the atmosphere.

In practical applications *IOA* is expressed in monetary units and referred to national economies (*MIOT*); this approach has the advantages of internationally recognized accounting standards and updated databases. However, results may be inaccurate due to the international trade flows accounting method. For this reason *multiregional IOA* models were developed in literature; they include several nations and goods and services flows between them within the same database.

The mathematical structure of the *IOA* - specifically *MIOT* - allows to a further change: from an economic sector a subsystem can be disaggregated, in order to assess its environmental impact with more detail. This model has been called *Hybrid Input - Output Analysis (HIOT)*.

The model formalized in chapter 4 of this thesis for energy efficiency assessment relies on all the *IOA* state of the art features. Thus, starting from the *World Input - Output Database (WIOD)* updated to 2010, a *multiregional hybrid* model will be developed (*H-WIOT*).

The energy efficiency intervention is the *LCA* functional unit and it's included in the *H-WIOT* as a disaggregate system with the following features:

- Its lifetime consists of a production phase and an operative phase;
- It belongs to Italian energy supply economic sector;
- It requires goods and services from the national economic system in order to produce its own final demand;
- Its final demand is an energy saving, which therefore should no longer be produced as final demand from the energy sector;
- Its final demand is prior quantified according to current evaluation methodologies.

Through *IOA* environmental extension and Leontief production model it will be possible to quantify functional unit embodied environmental impact, in a similar fashion to what is done for economic activities and their products. This is the *first goal* of the research and the proposed *LCA*.

Impact indicators are selected among those included in *WIOD*. They are:

- Fossil fuel consumption (coal, oil, natural gas);
- Greenhouse gas emissions (CO₂);
- Acidifying gas emissions (NO_x, SO_x);
- Water used;

- Human labour and working hours.

Social indicators are not commonly included in environmental *LCA*, however it's been chosen to include them in order to have a more comprehensive assessment and to understand how they can be effective in systemic energy efficiency evaluation.

Second goal of this thesis is the evaluation of annual avoided environmental impact due to energy efficiency intervention implementation. It is quantified through final demand *shock* analysis, one of *Input - Output* model main features.

The research *third goal* is the overall environmental net benefit evaluation for the whole project lifetime. It will be pursued according to the Italian legislative framework. Every intervention, indeed, is characterized by a lifetime and an energetic worsening rate, both set by GSE.

Annual environmental benefit experienced by the entire country is evaluated thanks to one of the *IOA* main features: final demand *shock* analysis. The *shock* corresponds to the energy efficiency obtained.

Focusing the entire intervention life cycle it's possible to see:

- An initial environmental cost, associated with the intervention production phase and quantified through *H-WIOT* model;
- An annual environmental benefit throughout intervention operational phase, estimated through the final demand *shock* analysis.

From the overall contribution of these two components, it is possible to quantify net environmental benefit at the end of lifetime. Impact is measured in term of different indicators, too.

These are the major differences between *LCA* approach proposed and current methodologies:

- The introduction of intervention production phase, for which the environmental impact is evaluated;
- Final demand *shock* on Italian energy sector generates a saving for the country. According to *LCA* approach, it's slightly greater than the *shock* itself because *LCA* includes the entire sector supply chain in the analysis;
- According to the Italian legislation, the adjective “*net*” indicates an improvement with respect to a technological or market baseline. Instead, through the proposed approach, “*net*” indicates that the production phase environmental expenditure is considered and included within intervention final environmental balance.

In the case study, *LCA* model is applied to 15 energy efficiency interventions, collected in Standard technical forms within the *Certificati Bianchi* scheme.

Interventions are chosen on the basis of boundary conditions that affect energy saving, cost investments available and the effective spread of such projects in the Italian context. All the analyzed interventions can theoretically be implemented.

Total production phase environmental impact, assessed through *H-WIOT*, highlights different specific impact of Italian economic activities: although some interventions are similar from an

economic point of view, they may be highly different on the basis of fossil fuels consumption or generated emissions. It is due to the involved supply chain by each project. Initial environmental impact is a burden on final net benefit, for this reason it should be carefully evaluated.

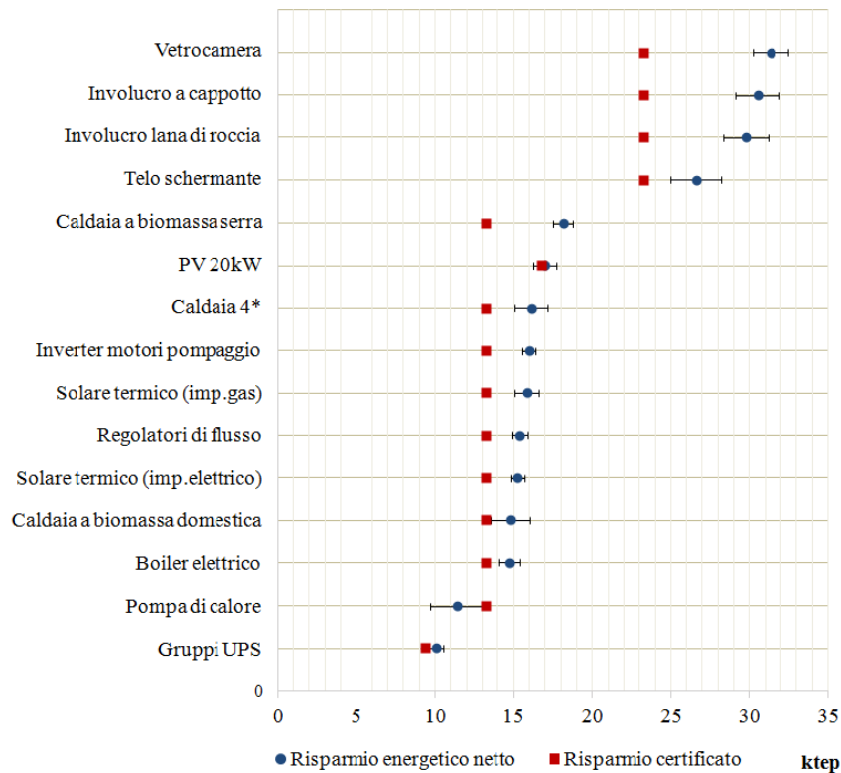


Figura A. Confronto tra risparmio energetico netto e risparmio energetico certificato dal GSE per gli interventi di efficientamento energetico analizzati.

In conclusion, the lifetime obtained results - from an energy standpoint - differ from the official quantification of savings. The difference amount depends on analyzed interventions, but generally actual methodologies appear underestimate overall energy savings, as can be seen in Figure A. However, it is comforting that proposed *LCA*, although some method differences, doesn't provide results completely in conflict with officially recognized methodology.

On the other hand production phase assessment and non-energy environmental impact indicators appears to be an added value with respect to the current methodology.

Indice

Riassunto esteso	5
Extended summary	10
Indice delle figure	17
Indice delle tabelle	18
Sommario	19
Parole chiave	19
Abstract	20
Key words	20
1. Introduzione	21
1.1. Risorse naturali e politiche ambientali	21
1.2. Obiettivi del lavoro	26
1.3. Struttura della tesi	27
2. Efficienza energetica in Italia	29
2.1. La normativa italiana	29
2.2. Gli attori coinvolti	31
2.2.1. Il soggetto obbligato	34
2.3. Gli interventi di risparmio energetico	36
2.4. Il calcolo del risparmio energetico	39
2.4.1. Scheda Tecnica Standard ST 37E	42
2.4.2. Scheda Tecnica Standard ST 39E	43
2.4.3. Analisi critica delle metodologie di calcolo del risparmio energetico	44
3. Valutazione dell'impatto ambientale dei beni e dei servizi	47
3.1. Analisi del ciclo di vita	47
3.2. Analisi Input - Output	50
3.2.1. Definizione generale	51
3.2.2. Il modello di Leontief	53
3.2.3. Assunzioni fondamentali	56
3.2.4. Potenzialità dell'analisi Input - Output	57
3.3. Analisi Input - Output delle economie nazionali	59
3.3.1. Tavole Input - Output monetarie	60
3.3.2. L'influenza del trattamento dei flussi commerciali	61
3.3.3. Tavola Input - Output multiregionale	63
3.4. Analisi Input - Output ibrida	65

4. Analisi di ciclo di vita degli interventi di efficientamento energetico	69
4.1. Obiettivo e ipotesi generali	69
4.1.1. Scelta dell'unità funzionale	70
4.1.2. Ipotesi generali	75
4.2. Modello di calcolo	77
4.2.1. Dataset e categorie di impatto	77
4.2.2. Analisi Input - Output ibrida	79
4.3. Analisi di inventario	85
4.3.1. Input del sistema	85
4.3.2. Valori teorici di riferimento per le emissioni in atmosfera	88
4.3.3. Analisi di incertezza	90
4.4. Analisi degli impatti e interpretazione dei risultati	92
4.4.1. Categorie di impatto selezionate e rispettivi indicatori	93
4.4.2. Impatto ambientale specifico di beni e servizi	97
4.4.3. Impatto ambientale associato alla fase di realizzazione dell'intervento	99
4.4.4. Impatto ambientale annualmente evitato durante la fase operativa dell'intervento	103
4.4.5. Bilancio ambientale netto a fine vita utile	105
4.4.6. Confronto con la metodologia in uso	110
Conclusioni	115
Nomenclatura	117
Riferimenti	120

Indice delle figure

Figura 1.1 Andamento del fabbisogno di energia primaria mondiale [Mtep]. Serie storiche [3].	22
Figura 1.2 Andamenti del fabbisogno di energia primaria pro capite (TPES) e del prodotto interno lordo pro capite (GDP) [5].	22
Figura 1.3 Emissioni mondiali di CO ₂ da combustione [Mton]. Serie storiche [2].	23
Figura 1.4 Emissioni regionali di CO ₂ da combustione [Mton]. Serie storiche [2].	24
Figura 1.5 Consumi finali (TFC) evitati cumulati in stati membri IEA per interventi di efficientamento energetico [12].	24
Figura 1.6 Emissioni di CO ₂ [Gton] da combustione ed emissioni evitate per efficienza energetica. Serie storiche [12].	25
Figura 2.1 Obiettivo 20-20-20 e scenario SEN di risparmio energetico previsto [20].	29
Figura 2.2 Obiettivi annuali TEE [21] e obiettivi assegnati all'Italia [11,20].	30
Figura 2.3 Strumenti incentivanti in Italia.	31
Figura 2.4 Meccanismo dei Certificati Bianchi italiano. Fonte ENEA.	33
Figura 2.5 Indicatore TEE/CAPEX proposto da FIRE [24] per interventi standardizzati campione.	35
Figura 2.6 TEE riconosciuti annualmente per tipologia. Serie storiche [26].	38
Figura 2.7 TEE riconosciuti e risparmi certificati annualmente. Serie storiche [26].	39
Figura 3.1 Le fasi del Life Cycle Assessment [34].	48
Figura 3.2 Flussi energetici in una generica economia nazionale [43].	51
Figura 3.3 Sistema produttivo a due processi e interfaccia con l'ambiente [5].	52
Figura 3.4 Flussi in ingresso e in uscita per un singolo processo e per un sistema di processi produttivi.	53
Figura 3.5 Tavola nazionale in unità monetarie (MIOT).	61
Figura 3.6 MIOT nazionale suddivisa in produzione endogena e importazioni.	62
Figura 3.7 Tavola nazionale Input - Output ibrida (HIOT)	65
Figura 4.1 Unità funzionale dell'LCA.	70
Figura 4.2 Suddivisione dei TEE rilasciati nel 2015 da progetti standard [26].	71
Figura 4.3 Modello computazionale H-WIOT.	82
Figura 4.4 Shock di domanda finale Δf associato a ogni unità funzionale.	86
Figura 4.5 Impatti specifici di beni e servizi per settore economico (ISIC Rev.3) e indicatore valutato.	98
Figura 4.6 Impatto energetico, ambientale e sociale associato alla fase di realizzazione degli interventi.	101
Figura 4.7 Risparmio energetico annuale di un'unità funzionale sul sistema italiano.	103
Figura 4.8 Emissioni annualmente evitate da un'unità funzionale sul sistema italiano.	104
Figura 4.9 Risparmio energetico generato negli anni dalla ST 37E.	106
Figura 4.10 Bilanci ambientali netti a fine vita tecnica.	108
Figura 4.11 Confronto tra risparmio energetico netto e risparmio energetico certificato.	110
Figura 4.12 Indice normalizzato I degli interventi campione, secondo differenti impatti energetici e ambientali valutati.	112

Indice delle tabelle

Tabella 2.1 Rendicontazioni di richieste di valutazione per tipo. 2014 [27].	38
Tabella 2.2 TEE rilasciati per tipologia di certificato [26].	41
Tabella 2.3 Schede Tecniche Standard predisposte dal GSE.	42
Tabella 4.1 Sintesi degli interventi analizzati.	73
Tabella 4.2 Costi di investimento delle unità funzionali disaggregati nella ISIC Rev.3.	87
Tabella 4.3 Composizione del parco di produzione elettrica.	89
Tabella 4.4 Fattori di emissione (EF) medi dei combustibili fossili.	89
Tabella 4.5 Quantità di emissioni inquinanti evitate per unità di energia primaria.	90
Tabella 4.6 Categorie di impatto scelte per l'analisi del ciclo di vita	94
Tabella 4.7 Impatto energetico e ambientale associato alla fase di realizzazione degli interventi e incertezze.	102
Tabella 4.8 Bilanci ambientali netti a fine vita tecnica e incertezze.	109

Sommario

La sfida energetico-climatica in corso a livello internazionale negli ultimi decenni sta responsabilizzando le nazioni ad adottare misure per fronteggiare la scarsità delle fonti fossili e per ridurre l'emissione in atmosfera di gas climalteranti e di inquinanti.

Iniziative politiche e private sono ormai orientate verso due soluzioni principali: la transizione del sistema energetico verso fonti rinnovabili e la diminuzione del consumo di combustibili fossili grazie a pratiche di *risparmio energetico* ed *efficienza energetica*.

Questa tesi si focalizza sull'efficienza energetica, proponendo un modello che intende analizzare gli interventi di efficientamento in modo più sistemico rispetto alle attuali metodologie di valutazione. Infatti, lo schema valutativo stabilito dalla normativa italiana si concentra sui risparmi energetici conseguiti durante la fase operativa dei dispositivi installati e ne trascura gli altri impatti ambientali.

Quindi, partendo da un esame critico dei metodi di valutazione in uso in Italia, viene introdotto lo stato dell'arte dell'*Analisi del Ciclo di Vita* e viene delineato un modello *Input - Output* efficace per la valutazione ambientale degli interventi: la sua struttura analitica è formalizzata per estendere l'applicabilità a quanti più casi pratici possibili. Infine viene applicato il modello proposto ad alcuni interventi di efficientamento energetico, catalogati nel meccanismo italiano dei Certificati Bianchi.

E' possibile valutare l'impatto ambientale totale associato alla fase di realizzazione dell'intervento ed il beneficio ambientale netto del sistema paese nell'arco della vita utile, in termini di risorse primarie ed in funzione di altri indicatori di impatto ambientale considerati.

Dall'analisi critica dei risultati ottenuti è possibile cogliere i punti di forza della presente ricerca, il valore aggiunto rispetto alle metodologie attualmente utilizzate, così come i limiti pratici che la caratterizzano e le ulteriori potenzialità di sviluppo ed applicazione.

Parole chiave

Efficienza energetica; Analisi del Ciclo di Vita; Analisi Input-Output; Analisi d'impatto ambientale; Politiche energetiche.

Abstract

The energy and climate challenge under way at international level in recent decades is empowering nations to adopt measures to counter the shortage of fossil fuels and reduce the emissions of greenhouse and pollutant gases into the atmosphere.

Private initiatives and policy institutions are now oriented towards two main solutions: the transition of the energy system towards renewable sources and the reduction of fossil fuel consumption through energy saving and energy efficiency intervention.

This thesis focuses on energy efficiency, proposing a model which aims to analyse the efficiency improvements in a more comprehensive way with respect to the current evaluation methodologies. In fact, the scheme established by the Italian policy maker evaluates the energy savings achieved during the operational phase of installed devices and neglects environmental impacts.

Thus, starting from a critical examination of the evaluation methods used in Italy, the *Life Cycle Assessment* state of the art is introduced and an effective *Input - Output* model is outlined for practical energy efficiency interventions environmental assessments. Its structure is formalized in order to extend the applicability to as many case studies as possible.

Finally, the proposed model is applied to some energy efficiency interventions. It is possible to assess the overall environmental impact of the intervention production phase and the real net environmental benefit experienced by country during the whole lifetime, in terms of primary energy consumption and in conjunction with other environmental impact indicators considered.

From critical analysis of the results will come to light the added value of a life cycle approach with respect to the currently used methods, its practical limitations and further potential for future applications.

Key words

Energy efficiency; Life Cycle Assessment; Input-Output Analysis; Environmental Impact Assessment; Energy policy.

1.

Introduzione

Questo capitolo vuole chiarire il concetto di risorse naturali e lo stretto legame con lo sviluppo, l'economia e l'ambiente. Viene poi rapidamente discusso il dibattito internazionale in corso, fino ad arrivare all'Italia e specificatamente all'efficienza energetica. Emergeranno da una parte gli obiettivi ambiziosi della comunità scientifica internazionale in materia ambientale ed energetica, ma dall'altra i limiti degli strumenti di valutazione sistemica dell'impatto ambientale. Gli obiettivi della presente ricerca verranno stabiliti al fine di intercettare tali punti deboli.

1.1. Risorse naturali e politiche ambientali

E' assodato lo strettissimo legame tra risorse naturali ed economia, con le prime che sostengono le attività umane e che vengono trasformate e degradate dai processi produttivi. Le risorse naturali sono necessarie per la stabilità e il benessere della società moderna. Tuttavia, la sfida che l'uomo deve affrontare per proseguire il trend di crescita economica e di sviluppo è incentrata su due peculiarità delle risorse disponibili in natura: la scarsità e gli effetti del loro utilizzo sull'ambiente.

Negli ultimi decenni, la crescente consapevolezza di ciò ha portato alla nascita di teorie economiche come la Bioeconomia di N.Georgescu-Roegen, secondo cui la crescita delle moderne economie è fisicamente limitata dalla disponibilità delle risorse naturali stesse [1]. Ne consegue una maggiore attenzione nei riguardi del loro sfruttamento e delle trasformazioni termodinamiche all'interno dei processi.

Vengono definite *capitale naturale* le fonti direttamente disponibili in natura. Sono perciò comunemente classificate in:

- Combustibili fossili, che includono carbone, petrolio greggio, gas naturale e combustibile nucleare. Sono considerati non rinnovabili in quanto il loro tasso di estrazione e sfruttamento è ben superiore a quello di rigenerazione naturale;
- Risorse minerarie, rappresentate da metalli e minerali nella crosta terrestre. Anch'essi sono non rinnovabili perché, seppur riciclabili, il riciclo al 100% è un limite ideale irraggiungibile [1];
- Acqua, considerata rinnovabile perché risultato del ciclo idrologico naturale;
- Terra, intesa come terreno utilizzabile dall'uomo per le sue attività;
- Energia solare, seppur non teoricamente vero, è un'energia rinnovabile vista l'enorme disponibilità e l'orizzonte di durata stimato dalle previsioni. Dall'energia solare derivano le altre fonti rinnovabili quali il vento, l'energia delle onde e la biomassa.

Citando l'ultimo rapporto statistico dell'*International Energy Agency* (IEA), a livello mondiale i consumi finali (TFC) sono sostenuti per oltre il 75% da fonti fossili, mentre il

fabbisogno di energia primaria (TPES) è colmato per l'86% da fonti fossili, come dimostra la Figura 1.1 [2].

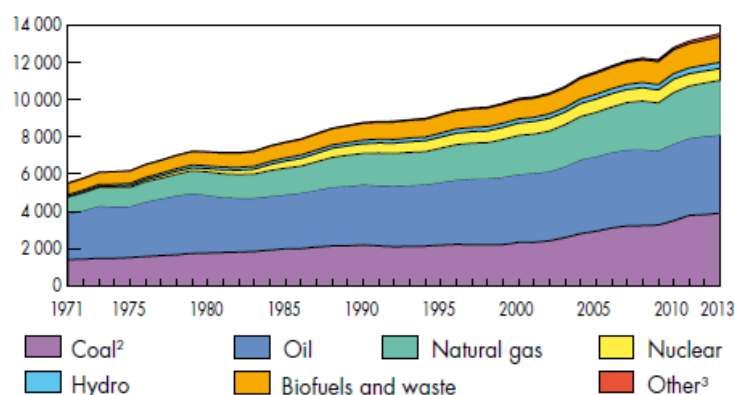


Figura 1.1 Andamento del fabbisogno di energia primaria mondiale [Mtep]. Serie storiche [3].

La crescita economica è accompagnata dal consumo di risorse e il grafico di Figura 1.2 ne dimostra il trend. Inoltre, ad accentuare il loro sfruttamento c'è anche l'enorme crescita demografica, che ha registrato un tasso di crescita annuo superiore al 2% per buona parte del XX secolo e con la previsione di raggiungere i 9 miliardi di persone sul pianeta nei prossimi 25 anni [4].

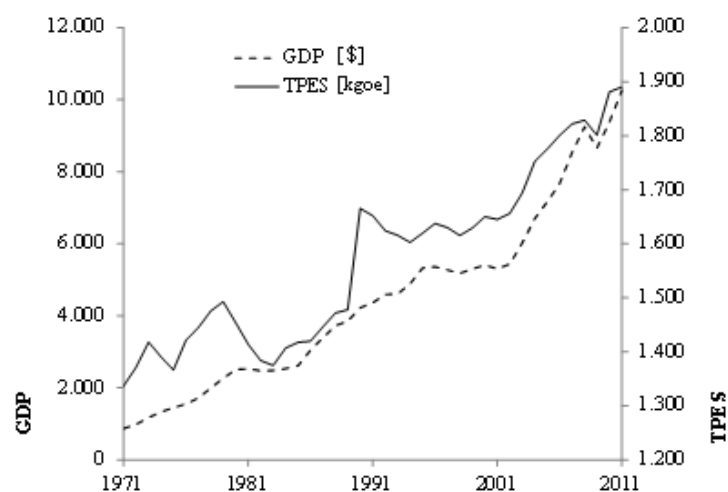


Figura 1.2 Andamenti del fabbisogno di energia primaria pro capite (TPES) e del prodotto interno lordo pro capite (GDP) [5].

Da questo quadro emerge come le decisioni internazionali in materia di politica energetica debbano essere consapevoli delle ripercussioni sulle risorse naturali, in particolar modo quelle

fossili. In Europa, visto l'alto livello di industrializzazione e di consumi domestici, circa il 53% dell'energia primaria viene importata da paesi extracomunitari [6]. Da un punto di vista economico, oltre ad essere indice di forte dipendenza energetica da altre nazioni, questo dato introduce un futuro problema di approvvigionamento a condizioni favorevoli poiché i paesi emergenti, la cui domanda di fossili è in forte crescita negli ultimi anni, ostacolano sul mercato gli Stati europei [7]. Per questi motivi si può affermare che il problema della dipendenza energetica è un nodo centrale della politica europea attuale.

Il problema non è soltanto legato alla scarsità di risorse: se questo condiziona principalmente le scelte politiche nazionali - o comunitarie -, il danno ambientale legato al loro utilizzo riguarda indistintamente tutti gli abitanti del pianeta.

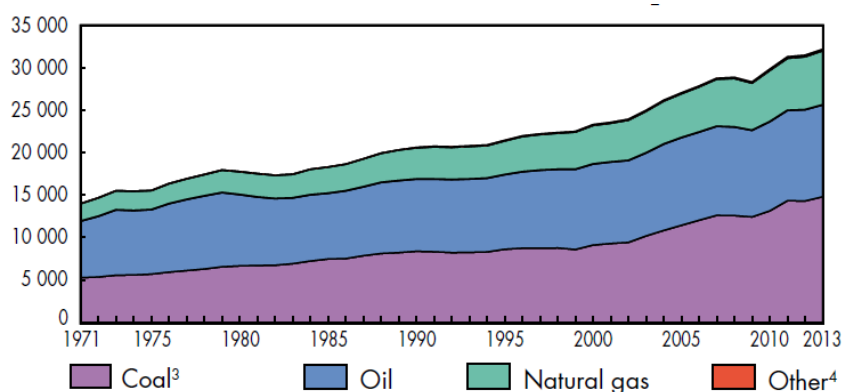


Figura 1.3 Emissioni mondiali di CO₂ da combustione [Mton]. Serie storiche [2].

La combustione di risorse fossili ha provocato e sta provocando un forte impatto sull'ambiente, in particolare sull'atmosfera, sul riscaldamento globale e sull'inquinamento delle riserve idriche. Si evidenzia, da dati della IEA in Figura 1.3, di che portata siano state negli ultimi decenni le emissioni di CO₂ dovute alla combustione di fonti fossili e come anch'esse seguano il trend della crescita economica delle nazioni, Figura 1.4.

Il dibattito internazionale, già aperto dagli anni '80 (Club di Roma, Brundtland Commission), ha cercato in più occasioni di fissare obiettivi quantitativi e linee guida in ambito energetico-ambientale. Una pietra miliare fu la ratificazione del Protocollo di Kyoto nel 1997, in cui gli Stati firmatari (*Annex 1* [8]) si imponevano l'obbligo di ridurre le proprie emissioni di CO₂ e altri gas serra in atmosfera. Tuttavia, alcuni paesi sviluppati ed emergenti responsabili di grandi consumi energetici restarono fuori dall'accordo, vanificando in parte gli sforzi dei paesi firmatari. L'Unione Europea è da sempre stata promotrice di politiche in questa direzione e, col passare degli anni e dei vertici internazionali sui cambiamenti climatici, è riuscita ad allargare il cerchio delle nazioni impegnate nella riduzione dei consumi energetici e delle emissioni climalteranti fino ad arrivare ai 195 paesi aderenti all'accordo del COP21, compresi Cina, Stati Uniti e India [9].

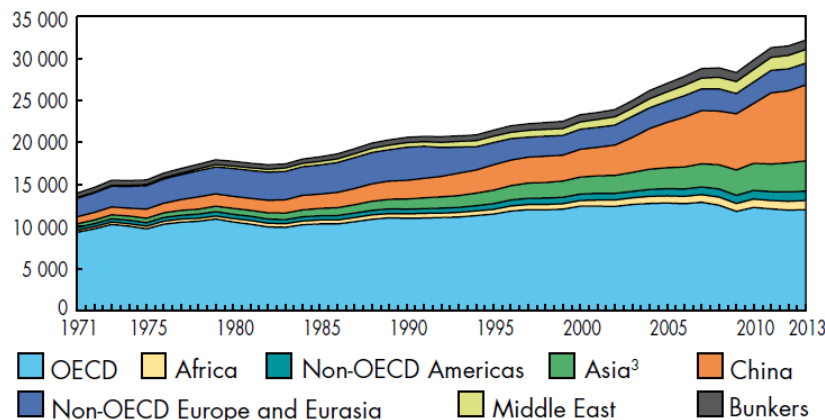


Figura 1.4 Emissioni regionali di CO₂ da combustione [Mton]. Serie storiche [2].

Per revisionare e rinnovare gli impegni presi nel Protocollo di Kyoto si sono tenuti annualmente i vertici COP (*Conference Of the Parties*): tra i più significativi quello di Copenaghen (2009), di Doha (2012), fino all'ultimo di Parigi nel dicembre 2015.

Per le politiche energetiche europee in corso, il momento chiave è stata la stesura dell'*Action Plan* nel 2007, divenuto attivo nel 2008, da cui deriva il *pacchetto 20-20-20* [10,11]. Questo indirizza le politiche energetiche fissando tre obiettivi quantitativi da raggiungere entro il 2020, riferiti all'Unione e validi per tutti gli stati membri:

- Riduzione delle emissioni di gas serra del 20% rispetto alle proiezioni all'anno 2005;
- Incidenza delle fonti rinnovabili del 20% sull'energia consumata (e sotto-obiettivo del 10% di biocarburanti per il trasporto terrestre);
- Riduzione del 20% dei consumi energetici primari rispetto alla proiezione al 2020.

I primi due sono obiettivi vincolanti. Il terzo, invece, è visto sia come un fine che come un mezzo da utilizzare per raggiungere i primi due e, pertanto, non è vincolante; tuttavia la sua esistenza è fondamentale perché pone il tema dell'efficienza energetica al centro delle politiche nazionali, non più come un'indicazione generica proposta dall'alto [10,12].

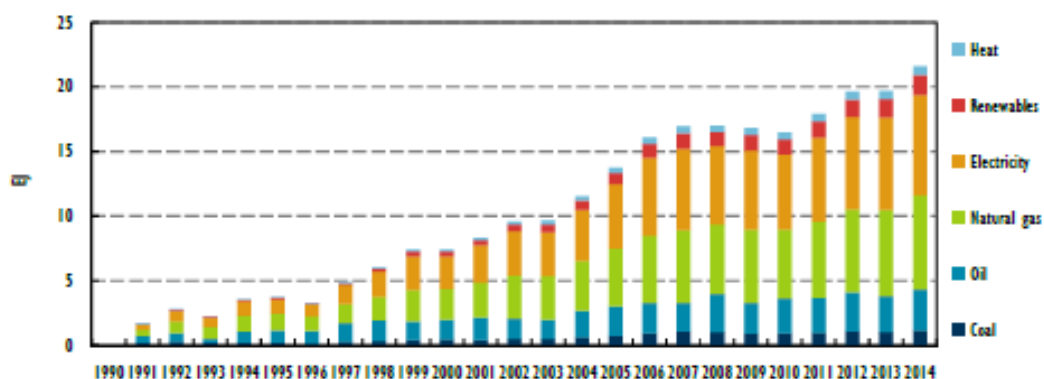


Figura 1.5 Consumi finali (TFC) evitati cumulati in stati membri IEA per interventi di efficientamento energetico [12].

Infatti, i dati dimostrano che l'efficienza energetica è lo strumento principale che negli ultimi decenni ha contribuito alla diminuzione dei consumi energetici e delle emissioni inquinanti dei paesi sviluppati [12]. Soffermandosi sulla decrescita di emissioni annuali di gas serra, un recente rapporto della IEA [12] afferma che la diffusione delle fonti rinnovabili è responsabile del 30% di questa inversione di tendenza, seconda proprio all'incremento di efficienza energetica nei processi produttivi.

La Figura 1.5 e la Figura 1.6 mostrano le riduzioni sia di energia ai consumi finali (TFC) che di emissioni di CO₂ ottenute grazie a pratiche di efficientamento energetico negli stati membri della IEA, per la maggior parte europei. Le emissioni annuali di anidride carbonica provenienti dai consumi finali sono costantemente cresciute negli anni, ma si può notare come, in assenza di misure di efficienza energetica, il picco raggiunto nel 2007 avrebbe superato le 13 Gton di CO₂; per cogliere l'importanza di tali misure si pensi che le emissioni evitate cumulate tra il 1990 e il 2007 sono circa 10,5 Gton, ovvero un intero anno di emissioni di CO₂ dei paesi membri della IEA [13].

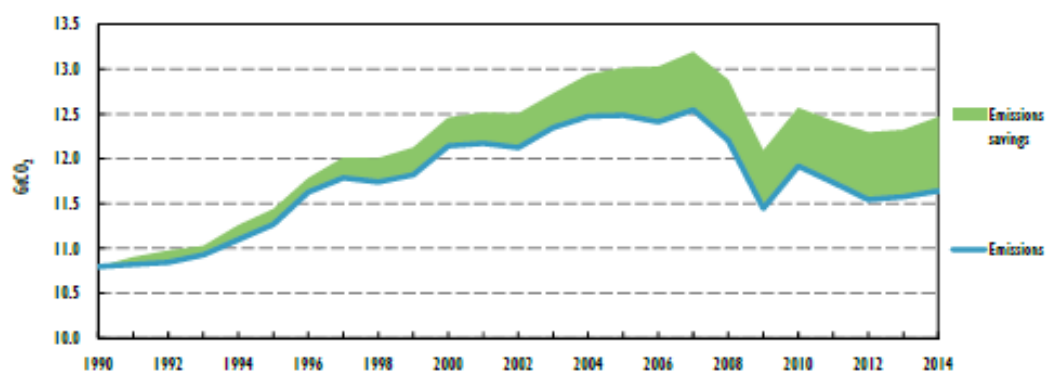


Figura 1.6 Emissioni di CO₂ [Gton] da combustione ed emissioni evitate per efficienza energetica. Serie storiche [12].

Per aumentare ulteriormente gli sforzi su questo tema, nel marzo 2011 è stato varato il *Piano Europeo per l'efficienza energetica* che impone altre misure vincolanti per gli stati membri dell'unione, concentrate sui vari comparti della pubblica amministrazione, sulle *utilities* energetiche, sull'industria e sull'edilizia privata. Inoltre, i recenti sviluppi politici internazionali in campo energetico fanno presagire un ulteriore incremento di investimenti in efficienza energetica sul medio-lungo termine. Ne sono esempio lo *US Clean Power Plan* e il dodicesimo piano quinquennale varato nel 2011 dalla Cina.

Tuttavia, esaminando i vari meccanismi in ambito di efficienza energetica, raramente le scelte nazionali e locali sono basate su analisi sistemiche e comprensive dei molteplici impatti ambientali: spesso il driver principale è la sanzione da evitare, l'obiettivo internazionale da raggiungere, l'incentivo in vigore o, talvolta, il rischio di danneggiare importanti attori industriali [14,15].

Con gli strumenti valutativi attualmente utilizzati potrebbe accadere che interventi virtuosi non vengano adeguatamente promossi né premiati: da tali strumenti sembrano emergere dei

limiti nei confronti di un approccio sistemico nella valutazione dell'efficienza energetica. Gli attuali strumenti di valutazione si limitano all'analisi dei consumi energetici finali per poi tradurli in impatti ambientali o, talvolta, sono esclusivamente tarati sulle emissioni di gas serra evitate [12,16–18]. In assenza di una valutazione comprensiva dell'intero ciclo di vita e del contesto in cui l'efficienza è prodotta, non è possibile coniugare impatti ambientali ed energetici considerati unitamente negli ambiziosi obiettivi che la comunità scientifica internazionale ha fissato negli ultimi anni.

L'efficienza energetica, come detto, è forse lo strumento su cui si fa maggiore affidamento per raggiungere tali obiettivi; l'Italia da anni è impegnata su questo fronte, attraverso strumenti e politiche incentivanti che saranno analizzati nel capitolo successivo per capire su quali aspetti si focalizzano, quali impatti valutano e in che modo.

A rafforzare l'interesse per l'efficienza energetica nel contesto italiano, nel maggio 2015 è stato approvato il Decreto Ministeriale (DM 20/05/15) che completa il percorso tracciato dal Decreto Letta sul settore gas, stabilendo l'assegnazione tramite gara del servizio di distribuzione di gas naturale da parte delle utilities energetiche [19]. La nuova normativa del settore gas, apparentemente lontana dal tema dell'efficienza energetica, si pone invece come un nuovo impulso agli interventi di risparmio energetico, poiché all'interno del disciplinare di gara sono attribuiti punti aggiuntivi ai concorrenti che presentano un piano di efficientamento all'interno del territorio in assegnazione (ATEM, Ambito Territoriale Minimo). La dimensione raggiungibile e la forte territorialità di questi interventi sono un'occasione che i soggetti in gara ed i privati potranno cogliere per mettere in atto pratiche virtuose, come filiere corte, uso di manodopera locale, nonché efficientamento dei processi produttivi più diffusi nell'ATEM, al fine di raggiungere la quota italiana degli obiettivi europei in materia di emissioni e consumi energetici.

Partendo da queste ragioni ci si è voluti focalizzare sull'analisi dell'impatto ambientale associato all'efficienza energetica, in maniera più completa rispetto alle metodologie attuali, che tendono a focalizzarsi su chi “produce” efficienza e non sull'intero sistema paese che ne beneficia. L'approccio che maggiormente si addice a questa finalità è l'analisi di ciclo di vita, o *Life Cycle Assessment*, attraverso cui viene valutato l'impatto ambientale di beni e servizi di varia natura, colmando i possibili vuoti delle metodologie di calcolo del risparmio energetico attualmente in uso.

1.2. Obiettivi del lavoro

Gli attuali strumenti di valutazione dell'efficienza energetica si focalizzano sulla fase operativa del progetto e sulla quantificazione dei risparmi conseguiti soltanto da un punto di vista energetico. Inoltre, dal capitolo introduttivo emerge l'inestricabile legame tra energia, ambiente ed economia: poiché questo legame è presente negli obiettivi comunitari fissati dal *Pacchetto 20-20-20* e nelle linee guida tracciate nella recente COP21, è quindi auspicabile disporre di strumenti valutativi adeguati e comprensivi di molteplici impatti ambientali.

A complemento di quella stabilita dal legislatore italiano, la presente ricerca vuole proporre una metodologia finalizzata ad aggiuntive valutazioni energetiche ed ambientali degli

interventi di efficientamento energetico. Lo strumento idoneo a tale scopo è l'analisi del ciclo di vita.

Pertanto verrà introdotto lo stato dell'arte dell'analisi dell'LCA e si giungerà allo strumento computazionale utilizzato per il caso pratico, l'*analisi Input - Output* (IOA). Le varianti della IOA presenti in letteratura saranno esaminate al fine di scegliere ed utilizzare quella più adatta ad essere applicata al caso in esame. Quindi sarà formalizzato il modello di analisi ibrida per lo studio dell'efficienza energetica così da essere riproducibile ed estendibile a quanti più interventi e categorie di impatto possibili.

Seguendo l'approccio dettato dalla serie ISO 14040-14044, che regola l'LCA, verrà delineato il campo di applicazione dello studio, saranno motivati gli impatti ambientali considerati e chiariti i dati necessari a condurre l'analisi dell'unità funzionale. Quindi il modello verrà applicato ad alcuni interventi campione e se ne analizzeranno i risultati ottenuti.

Attraverso l'LCA verranno perseguiti due obiettivi specifici su casi studio opportunamente selezionati tra quelli più diffusi nel panorama italiano:

- La valutazione dell'impatto ambientale associato alla fase di realizzazione, in termini energetici, ambientali e anche sociali;
- La valutazione dell'impatto ambientale evitato durante la fase operativa;
- La stima dell'impatto ambientale netto evitato a fine vita utile dei progetti.

Infine i risultati ottenuti saranno confrontati con l'attuale sistema di valutazione dei risparmi energetici dettato dalla normativa italiana in materia.

1.3. Struttura della tesi

Dopo la breve introduzione del contesto in cui si inserisce questo lavoro, la ricerca si struttura nel modo seguente:

- **Capitolo 2.** Vengono presentati l'attuale scenario dell'efficienza energetica in Italia, gli strumenti utilizzati dal *policy maker*, gli attori che ne fanno parte e il ruolo di ognuno di essi. Con il supporto degli ultimi rapporti di settore, vengono analizzati lo stato dell'arte degli interventi per "produrre" efficienza energetica ed i diversi metodi di valutazione stabiliti dalla normativa in vigore. Da questo capitolo emergerà il metodo di calcolo in uso per la valutazione del risparmio energetico.
- **Capitolo 3.** Questo capitolo contiene un'introduzione sullo stato dell'arte dell'analisi del ciclo di vita (LCA) e la conseguente presentazione dell'analisi *Input - Output* (IOA) come applicazione pratica di LCA utilizzata in questa ricerca. La IOA è lo strumento designato per la contabilità ambientale e per la misurazione dell'energia primaria associata a un processo o ad un'economia nazionale. Vengono illustrate linearmente le fasi della costruzione dello strumento proposto per l'analisi dell'efficienza energetica, partendo dalle strutture matematiche dei modelli di Leontief per arrivare alle tavole monetarie rappresentative delle economie nazionali, utilizzate nelle applicazioni pratiche. Sono quindi esaminati due diversi metodi di

trattamento dei flussi di *import/export* tra nazioni al fine di scegliere quello che fornisce i risultati più accurati per il caso in esame; infine viene illustrata la struttura dell'*Analisi Input - Output Ibrida* (HIOT). Al termine di questo capitolo si avrà a disposizione lo strumento adattabile allo studio degli interventi di efficientamento energetico.

- **Capitolo 4.** Seguendo il protocollo LCA, normato dalla ISO 14044, viene inizialmente definito lo scopo ed il campo di applicazione dell'analisi di ciclo di vita. Successivamente viene definita l'unità funzionale e vengono chiarite le ipotesi sul modello e sui dati utilizzati. Quindi il modello *Input - Output ibrido multiregionale* viene formalizzato, motivando il *dataset* e le categorie d'impatto selezionati. I dati in ingresso al caso studio vengono collezionati nell'analisi di inventario e successivamente il modello proposto può essere applicato alle unità funzionali scelte. Infine, vengono discussi ed interpretati i risultati ottenuti dall'analisi dell'impatto, concludendo con un confronto tra i risultati dell'approccio LCA e quelli ottenuti dal corrente metodo di calcolo dei risparmi energetici.

Infine, nelle conclusioni vengono evidenziati i contributi innovativi di questa tesi, confrontati i risultati ottenuti con gli obiettivi del lavoro e sono discussi eventuali limiti, punti di forza e possibili miglioramenti della metodologia proposta.

2.

Efficienza energetica in Italia

L'ambito dell'efficienza energetica è trasversale e molto discusso nel vasto panorama di politiche energetiche mondiali. In questo capitolo ci si vuole concentrare sul contesto italiano e sulle peculiarità delle metodologie di valutazione degli interventi di efficientamento energetico, stabilite all'interno del meccanismo dei Certificati Bianchi.

Lo scopo è far emergere i gradi di libertà dei soggetti che “producono” efficienza ed il metodo attualmente in uso per il calcolo del risparmio energetico. Sarà così possibile individuare le criticità del meccanismo, all'interno delle quali questo lavoro di tesi intende porsi.

2.1. La normativa italiana

Nel 2007 il Parlamento europeo ha approvato il già citato pacchetto 20-20-20 e, a complemento di questo, il pacchetto *clima-energia* nel 2008. Gli stati membri dell'Unione hanno avuto la possibilità di scegliere quali misure e quali strumenti adottare per il raggiungimento degli obiettivi comuni al 2020. Ad esempio, il governo britannico, da anni attento all'abbattimento delle emissioni di gas serra, ha incentrato la politica di efficienza energetica sulle emissioni di CO₂ evitate in modo da riassumere il primo e il terzo obiettivo del pacchetto 20-20-20, integrando per quanto possibile il meccanismo dell'*EU Emission Trading System* (EU-ETS) e dell'efficienza energetica.

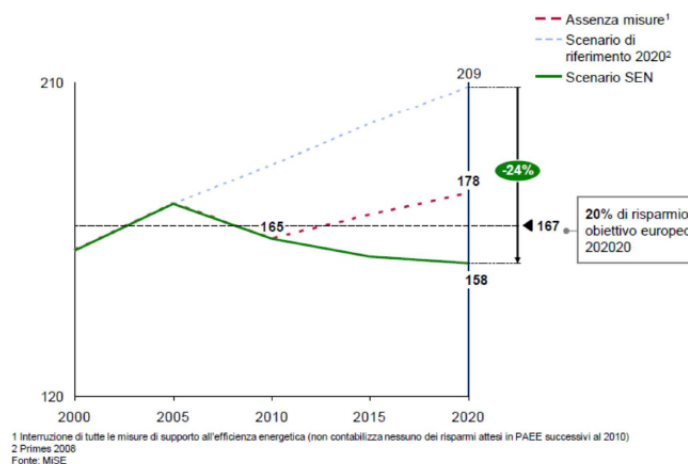


Figura 2.1 Obiettivo 20-20-20 e scenario SEN di risparmio energetico previsto [20].

L'Italia ha rivisto la propria strategia energetica sulla base dei nuovi obiettivi comunitari e dell'aggiornamento delle previsioni, in particolare sulla quota rinnovabile di produzione elettrica. Il *Piano d'Azione Nazionale* (PAN), in vigore dal 2007, è stato aggiornato nel 2011

e quindi sostituito dalla Strategia Energetica Nazionale (SEN) nel 2013, in Figura 2.1 [20]. La più grande modifica effettuata riguarda la produzione elettrica da fonti rinnovabili che, grazie ai generosi incentivi sul settore fotovoltaico, ha superato di gran lunga le previsioni; questo ha portato alla recente sospensione della tariffa onnicomprensiva per le nuove installazioni fotovoltaiche e all'aggiornamento della strategia energetica italiana.

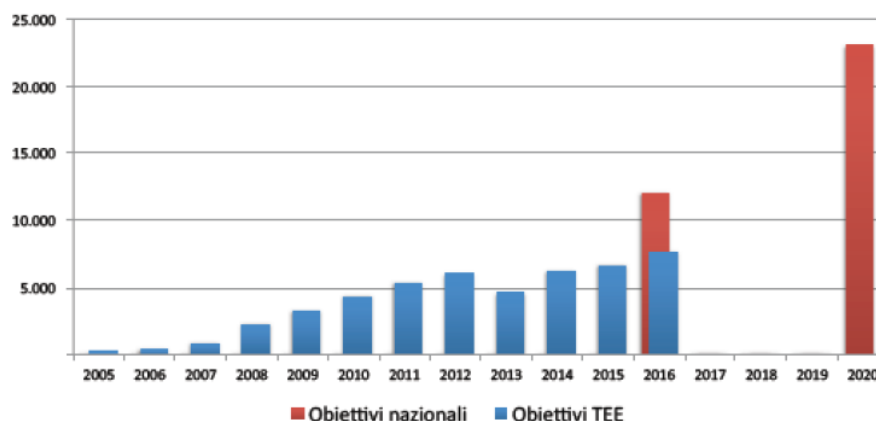


Figura 2.2 Obiettivi annuali TEE [21] e obiettivi assegnati all'Italia [11,22].

Come si evince dal grafico in Figura 2.2, il ruolo dell'Italia nella realizzazione del pacchetto europeo 20-20-20 è il conseguimento all'anno 2020 di un risparmio di energia primaria rispetto alla proiezione dal 2010, pari a circa 20 Mtep/anno. Nel PAN è stato fissato un obiettivo intermedio a fine 2016, pari a 10,88 Mtep/anno [23]. Gli strumenti che l'Italia ha messo in campo in questi anni sono diversi e agiscono trasversalmente nei tre obiettivi della direttiva europea.

Lo schema in Figura 2.3 mostra quale obiettivo ognuno di essi colpisce. Non bisogna sottovalutare l'aspetto temporale: non tutti gli strumenti sono stati creati nel 2007 e per questo l'utilizzo degli stessi può essere influenzato dalla comparsa di un nuovo tipo di incentivo. E' il caso dei certificati bianchi in ambito residenziale, i quali vengono meno sfruttati dopo la creazione del Conto Termico nel 2013 per concentrarsi nel settore industriale.

Sono stati utilizzati strumenti di promozione dell'efficienza energetica molto differenti tra loro. I certificati bianchi, o Titoli di Efficienza Energetica (TEE), sono senza dubbio quelli che hanno portato i risultati più consistenti. Il meccanismo è regolato dal DM 28 dicembre 2012 (o *Decreto Certificati Bianchi*) [21], in attuazione del D.Lgs. 28/11. Lo scopo è di incentivare gli interventi di efficientamento energetico sui consumi degli utenti finali, imponendo un target su alcuni soggetti obbligati, i quali verranno remunerati dal GSE con un apposito incentivo di tipo *cap & trade*. I TEE sono quindi interscambiabili in un apposito mercato. L'incentivo trova sostegno nelle componenti tariffarie per il servizio di trasporto e distribuzione dell'energia elettrica e del gas naturale [19,21].

Ci si soffermerà su questo meccanismo perché è quello che ha dato vita ai maggiori progetti di efficientamento energetico, sia come dimensione che come quantità assoluta, con un

obiettivo al 2020 del 60% sul totale dei risparmi energetici conseguiti [22]. Un ulteriore motivo è che attraverso il *Decreto Certificati Bianchi* il legislatore e l'AEEGSI stabiliscono le linee guida su come valutare il risparmio energetico. Queste saranno tenute valide come confronto e punto di partenza anche nella valutazione proposta in questa tesi.

Tuttavia non bisogna trascurare altri strumenti incentivanti, importanti per la diffusione sempre più capillare dell'efficientamento energetico:

- *Conto termico*, creato nel 2007, è specifico per incentivare piccoli interventi di coibentazione all'involucro edilizio, impianti termici di condizionamento e acqua calda sanitaria conclusi dopo il 2012;
- *Detrazioni fiscali*, in percentuale variabile tra il 55-65% dell'investimento, permettono al consumatore di coprire una parte dell'investimento in apparecchi, impianti o ristrutturazioni domestiche;
- *Obblighi imposti da limiti di legge* (ad esempio le lampadine ad incandescenza tolte dal commercio o la catalogazione degli edifici in classi energetiche), sono strumenti di comando e controllo che lo Stato può utilizzare per imporre degli standard minimi di efficienza. Sono il riferimento per il criterio di *addizionalità* nel meccanismo dei TEE.

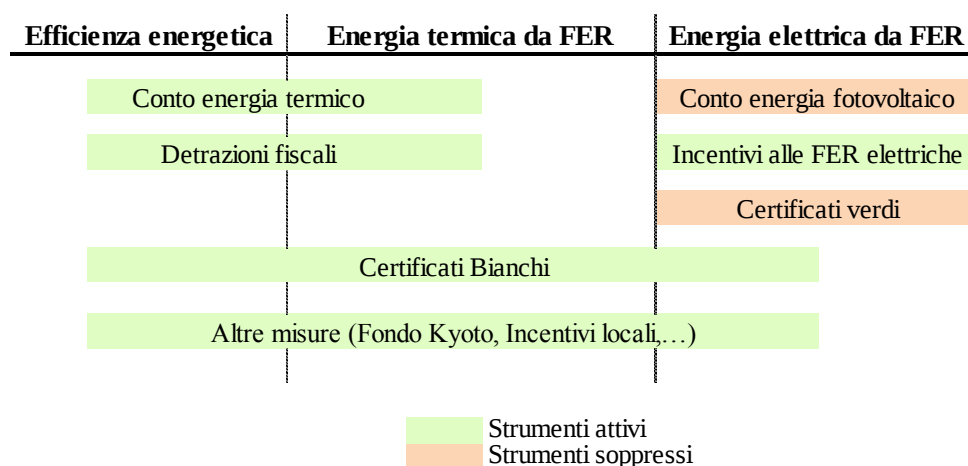


Figura 2.3 Strumenti incentivanti in Italia.

2.2. Gli attori coinvolti

E' necessario uno sguardo alle parti coinvolte nel meccanismo italiano dei Certificati Bianchi al fine di comprendere chi può essere interessato alle potenzialità dello strumento sviluppato in questa ricerca.

Il soggetto obbligato è la figura a cui, annualmente, viene assegnato un target di risparmio energetico da ottenere. La scelta delle figure sulle quali porre l'obbligo di risparmio non è dettata dalle direttive europee: ogni stato, a seconda del meccanismo in atto e del contesto di

mercato, ha libertà di scelta. Diversi autori hanno studiato i pro e i contro di meccanismi differenti tra loro, come quelli presenti in Italia, Regno Unito, Francia e Belgio (regione autonoma delle Fiandre) senza trovare una soluzione ottimale. Tendenzialmente la scelta dei soggetti obbligati si divide tra distributori di energia (le cosiddette *utilities*) e grandi consumatori finali (ad esempio centri commerciali, hotel, banche, uffici pubblici, ...) [15,18]. Nel Regno Unito, dove il meccanismo dell'efficienza energetica è associato alla riduzione di CO₂, sono obbligati i consumatori finali di grandi dimensioni, ma non tanto da rientrare nel mercato dell'EU-ETS. In questo modo si è voluto allargare in numero di attori in questo mercato, aumentandone la liquidità.

L'Italia, invece, ha fatto una scelta differente. Il meccanismo dei Certificati Bianchi è stato introdotto per la prima volta in Italia nel 2001, ma si assiste ad un importante utilizzo solo dal 2005, quando è stato creato l'apposita piattaforma per lo scambio dei titoli negoziabili. Un TEE corrisponde a 1 *tep* di energia primaria risparmiata ed è in possesso del soggetto che, attraverso un particolare progetto, dimostra al GSE di aver fatto risparmiare tale energia ad un'utenza finale.

In Italia i soggetti obbligati sono i distributori di energia elettrica e gas naturale. Ad essi si sono progressivamente aggiunte altre persone giuridiche, come le ESCo o le società dotate di certificazione ISO 50001, che traggono profitti dall'implementazione di progetti di efficienza energetica attraverso la formula del *performance contracting* e la vendita dei TEE sul mercato. La quantità obiettivo di TEE in circolazione deriva direttamente dall'obiettivo di risparmio energetico che il legislatore fissa per un determinato anno e viene suddivisa tra i soggetti obbligati (che hanno almeno 50000 clienti) proporzionalmente alle quote di mercato, ovvero ai volumi di gas o elettricità da essi distribuiti. Questa quantità viene chiamata quota d'obbligo.

Al 31 maggio di ogni anno i soggetti obbligati devono consegnare al GSE la propria quota d'obbligo di certificati; se non è stata registrata loro una tale quantità di risparmi energetici, dovranno rivolgersi al mercato per ottenerli o altrimenti pagare una sanzione.

Tuttavia il meccanismo, rappresentato in modo articolato in Figura 2.4, prevede molti attori in gioco ed è più complesso di come schematizzato sinora.

Tra le parti in gioco, diverse di esse possono essere interessate più o meno direttamente da questa ricerca:

- Soggetti obbligati e soggetti volontari, ovvero le società che interagiscono sul mercato dei TEE scambiandosi titoli. Questi realizzano direttamente o commissionano i progetti di efficienza; di conseguenza la scelta di quale intervento fare è in mano loro;
- GSE (Gestore dei Servizi Energetici) è responsabile delle attività di gestione, valutazione e certificazione dei risparmi energetici, come previsto dal DM 28 dicembre 2012;
- ENEA e RSE, rispettivamente ente pubblico e società del gruppo GSE che si occupano di ricerca ed innovazione tecnologica. Affiancano il GSE nella valutazione e verifica dei risparmi energetici e hanno redatto alcune delle Schede Tecniche;

- AEEGSI è il regolatore del settore energetico italiano. Nel meccanismo dei certificati bianchi traccia le linee guida che gli operatori dovranno seguire, definisce le sanzioni e supervisiona l'operato del GSE.

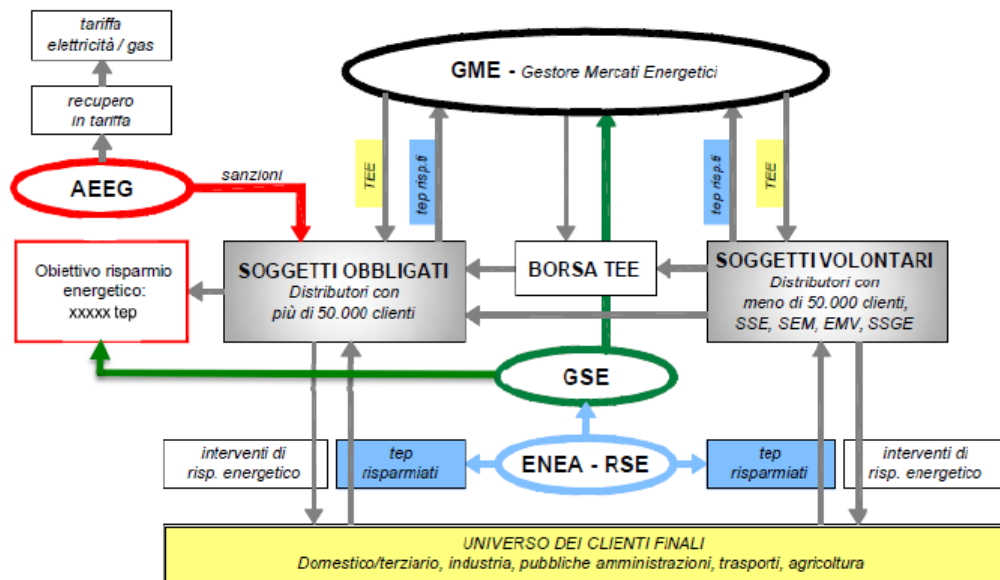


Figura 2.4 Meccanismo dei Certificati Bianchi italiano. Fonte ENEA.

I soggetti obbligati e volontari sono coloro che maggiormente potrebbero e dovrebbero essere interessati da un innovativo metodo di valutazione degli interventi e dei risparmi energetici associati, ma si vedrà in seguito quale logica guida le loro scelte.

Per questo motivo l'interlocutore ideale di questo lavoro va ricercato a livello di policy maker, quindi GSE o AEEGSI, i quali interagiscono strettamente con i legislatori regionali ed il MiSE (Ministero dello Sviluppo Economico). Sono loro gli attori che stabiliscono i procedimenti di valutazione ufficiali a cui attenersi e dettano le linee guida sugli interventi da privilegiare, attraverso aggiustamenti degli incentivi riconosciuti.

Volendo cogliere l'occasione delle gare d'ATEM, la Stazione Appaltante è la figura che valuta le proposte dei concorrenti in gara [19]. Di conseguenza assegnerà al piano di interventi presentato un punteggio, che attualmente si basa esclusivamente sulla quantità di energia risparmiata secondo le metodologie di calcolo tradizionali.

Si fa notare, tra l'altro, che nella seconda metà del 2015 è stata avviata una discussione pubblica tra MiSE, GSE, ENEA e *stakeholders* privati al fine di revisionare le Linee Guida [24] e rendere più efficace la promozione di determinati interventi e ridefinire i nuovi obiettivi di risparmio annuale nazionali.

2.2.1. Il soggetto obbligato

Si vuole ora approfondire il ruolo di un soggetto obbligato al fine di comprendere appieno gli attuali criteri di scelta degli interventi di efficientamento energetico all'interno del meccanismo dei *Certificati Bianchi*.

Supponendo di schematizzare i flussi economici che interessano un distributore di gas naturale, i principali flussi in uscita sono costituiti da:

- Contratti a lungo termine per l'approvvigionamento di gas naturale;
- Spese interne che riguardano i salari dei dipendenti e altre spese aziendali, di marketing e quant'altro;
- Manutenzione e investimenti programmatici sugli impianti di distribuzione e stazioni di decompressione di II livello;
- Produzione di interventi di efficienza energetica o acquisto dei TEE sul mercato, al fine di raggiungere la quota d'obbligo dell'anno t ; questo denaro va alle aziende private che effettuano i lavori o all'offerente dei certificati sul mercato.

I flussi economici in ingresso sono:

- Tariffe di distribuzione e misura del gas naturale, una componente regolata dall'Autorità e pagata dai clienti finali;
- Remunerazione all'anno $t+1$ del 100% dei certificati prodotti e riconsegnati al GSE, valorizzati al prezzo corrente.

La recente modifica alla normativa del settore distribuzione gas non altera questo schema, ma aggiunge alcuni flussi economici. Prevedendo una *quota addizionale* di risparmio energetico fino a un massimo del 20% della quota d'obbligo, il distributore può produrre più efficienza della sua quota d'obbligo e, conseguentemente, l'investimento sostenuto sarà più elevato. Inoltre ogni anno dovrà anticipare il valore dei TEE addizionali agli enti locali poiché generalmente la proprietà delle reti è in mano ad essi mentre l'utilizzo è in mano ai Distributori; infine la remunerazione¹ dei TEE addizionali da parte del GSE è stata fissata al 50% invece che al 100% [19].

Se è vero che aumentano gli esborsi economici per il Distributore verso gli enti locali e verso le aziende private che realizzano gli interventi, è necessario ricordare che, attraverso la vittoria della gara, l'appalto prevede il monopolio nella distribuzione di gas naturale all'interno dell'ATEM per la durata di 12 anni e quindi anche il flusso di cassa entrante dalle tariffe di distribuzione (regolate dall'Autorità) aumenterà in proporzione. E' quindi nel pieno interesse del distributore presentare un piano di efficientamento energetico con l'obiettivo di raggiungere il massimo del punteggio disponibile alla corrispondente voce del disciplinare di gara. La soglia massima di titoli addizionali è regolata dalla eq. (2.1) e non vengono attribuiti ulteriori punti in gara se il proponente eccede tale limite. E' lampante come in questo caso non sia nell'interesse dell'azienda superare la quota del 20%.

¹ L'art.8 del [19] lascia aperta la possibilità che tale percentuale possa essere innalzata al 100% se

$$TEE_{add MAX} \leq q_{obbligo} \cdot 20\% \quad (2.1)$$

Emerge come l'aspetto energetico sia un mezzo per arrivare a un fine, che è quello della vittoria dell'appalto e conseguentemente del profitto della utility energetica. Questo approccio porta inevitabilmente a pianificare i progetti secondo un semplice criterio: scegliere gli interventi meno costosi fino al raggiungimento della soglia prefissata di risparmio energetico. Anche associazioni di settore identificano tra i principali driver di scelta dell'intervento il rapporto che tra l'incidenza dell'incentivo (TEE) e l'investimento economico iniziale (CAPEX) [25]. Il proponente tende a scegliere progetti con un valore elevato di tale indicatore, così da accelerare i tempi di ritorno dell'investimento grazie all'incentivo [26]. A titolo esemplificativo, nella Figura 2.5 si riportano i rapporti calcolati per gli interventi campione analizzati nel Capitolo 4.

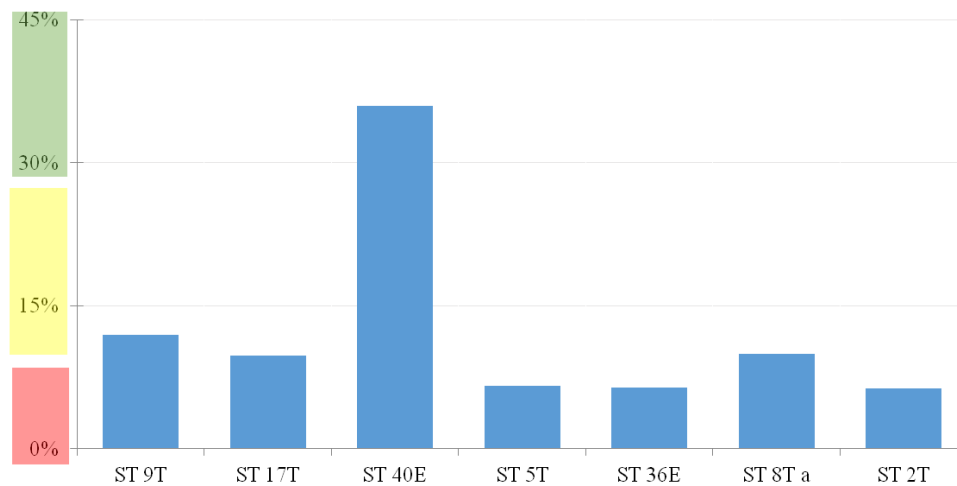


Figura 2.5 Indicatore TEE/CAPEX proposto da FIRE [25] per interventi standardizzati campione.

Come emergerà nel seguito nella Sezione 2.3, l'aver riscontrato valori molto bassi in pressoché tutti gli interventi non deve sorprendere: i progetti valutabili con schede standardizzate sono tendenzialmente poco convenienti se di grandi dimensioni e si prestano meglio a piccoli interventi distribuiti. Invece per i grandi progetti valutati specificatamente l'incidenza dell'incentivo è mediamente più alta.

Tuttavia, nel caso delle gare d'ATEM, se venisse promossa l'attribuzione di un punteggio differente sulla base del miglior intervento o del miglior mix di interventi a parità di *tep* totali risparmiati allora sarebbe nell'interesse anche del soggetto obbligato valutare l'efficienza energetica in modo più completo.

2.3. Gli interventi di risparmio energetico

Le Linee Guida EEN 9/11 [27] definiscono 6 settori principali all'interno dei quali si articolano gli interventi di efficienza energetica. I settori sono:

- Industriale;
- Civile, che comprende il residenziale, la pubblica amministrazione e altri edifici pubblici;
- Illuminazione, pubblica e privata;
- Reti di distribuzione;
- Trasporti, sostanzialmente l'efficientamento energetico dei veicoli tradizionali;
- Grandi Progetti, categoria nuova per incentivare gli interventi su infrastrutture e grandi processi industriali eccedenti i 35 *ktep* di risparmio energetico nell'arco della vita utile.

Le categorie più interessanti, numeri alla mano, sono le prime due. Attualmente in esse si concentra oltre il 90% dei risparmi conseguiti. In ambito industriale gli interventi più corposi riguardano i processi termici energivori nei settori del cemento, delle ceramiche e nelle acciaierie, sia agendo sull'efficienza delle camere di combustione che sulla riduzione e sul controllo dei transitori in modo da avere un'erogazione della potenza termica più costante e programmabile. Non si lavora soltanto sul lato termico, ma anche sul risparmio di elettricità, con interventi trasversali a tutto il settore industriale su macchinari utensili e motori elettrici spesso datati ed energivori. Ancora, si interviene sul riassetto impiantistico di grandi fabbriche e nell'ottimizzazione della gestione dei processi, anche qui operando tramite il *demand side management*. Infine, nel settore civile i più comuni progetti vengono realizzati sull'involucro edilizio, sulle coperture e sugli impianti termici. Secondari come incidenza sono gli interventi sugli elettrodomestici al fine di diminuire il consumo di energia elettrica.

L'illuminazione era il settore trainante dei certificati bianchi nei primi anni del meccanismo con la fase di sostituzione delle lampade ad incandescenza domestiche. Successivamente è stata la volta delle lampade a LED nell'illuminazione pubblica ed ora si sta assistendo ad una flessione.

La grande varietà di interventi rende difficile una catalogazione degli stessi. Tuttavia, questa sarebbe importante per snellire i tempi burocratici tra la realizzazione dei lavori e la certificazione dei risparmi, che dà accesso all'incentivo. Il legislatore italiano, operativamente nella figura di GSE, ENEA ed RSE, ha implementato per questo motivo delle schede tecniche di valutazione: ognuna di esse racchiude una rosa di progetti simili tra loro e consente di calcolare rapidamente il risparmio energetico conseguito e l'incentivo corrisposto dal GSE. Tanto più le schede riescono a coprire il vasto panorama di progetti, tanto più semplificato sarà il meccanismo.

In Italia sono attualmente in uso 38 Schede Tecniche, suddivise tra 28 Standard (ST-S) e 10 Analitiche (ST-A). E' riscontrabile una grande differenza con l'analogo sistema francese: il legislatore francese ha pubblicato ben 195 schede semplificate, consentendo una enorme diversificazione degli interventi e anche una più precisa rendicontazione dei risparmi; ne risulta che, storicamente, la maggior parte dei risparmi viene conseguita con interventi

standardizzati, anche di medio-grandi dimensioni. Il meccanismo italiano fa più affidamento sui progetti valutati singolarmente, soprattutto in ambito industriale, ma ne conseguono una complicazione burocratica e una pioggia di proposte di misurazioni (PPPM), di richieste di valutazione (RVC) e certificazioni a cui il GSE deve rispondere nel minor tempo possibile.

Il DM Certificati Bianchi stabilisce tre metodi di valutazione dei progetti di efficientamento energetico:

- *standardizzata*, il risparmio energetico generato in un anno dal dispositivo installato (o nel caso di retrofit) è calcolato attraverso il risparmio specifico di una singola unità fisica di riferimento (UFR). Non si procede a misurazioni dirette, ma si stima il risparmio di 1 UFR attraverso casi noti e opportune ipotesi. Sono state compilate svariate ST-S, applicabili soprattutto nei settori dell'edilizia civile, degli impianti termici e di condizionamento estivo, dell'illuminazioni e per altri piccoli interventi in ambito industriale;
- *analitica*, il risparmio energetico generato in un anno è calcolato misurando direttamente pochi parametri del sistema e sfruttando un algoritmo di calcolo fornito dal GSE. Le misurazioni sono eseguite con il dispositivo in funzione, quindi a priori si può soltanto stimare il beneficio generato che sarà influenzato dalle condizioni di esercizio. Sono attualmente in uso 10 ST-A che caratterizzano interventi di medie dimensioni, soprattutto nel settore industriale;
- *consuntiva*, vengono proposti al GSE una relazione sul progetto e un programma di misura (PPPM): il GSE deve approvarli, con il supporto di ENEA e RSE, e successivamente procedere a verifiche periodiche. Il risparmio energetico è calcolato sulla base di misurazioni dirette, tante quante previsto dal PPPM. Ogni progetto è valutato singolarmente e questa metodologia è utilizzata per i progetti con pochi precedenti o di più grandi dimensioni, spesso in impianti dove, per altre finalità, sono presenti strumenti di controllo e misura dei flussi circolanti.

Ogni progetto presentato, a seconda del tipo di valutazione a cui è soggetto, deve superare una dimensione minima per vedersi riconosciuti i TEE corrispondenti: la soglia minima è di 20 tep per i progetti standard, 40 tep per gli analitici, 60 tep nei primi 12 mesi per i progetti valutati a consuntivo.

Nell'ottica di voler implementare una pianificazione degli interventi in un determinato territorio - ad esempio il caso del concorrente alla gara di affidamento dell'ATEM di distribuzione gas - risulta estremamente difficile prevedere con precisione l'energia primaria risparmiata, o perlomeno i TEE conseguiti, tramite interventi valutati a consuntivo. I gradi di incertezza sono almeno due: quella che il proponente ha sull'accettazione del progetto da parte del GSE e quella sulla quantità di energia risparmiata, che soltanto per i primi 12 mesi deve superare la soglia minima imposta per legge.

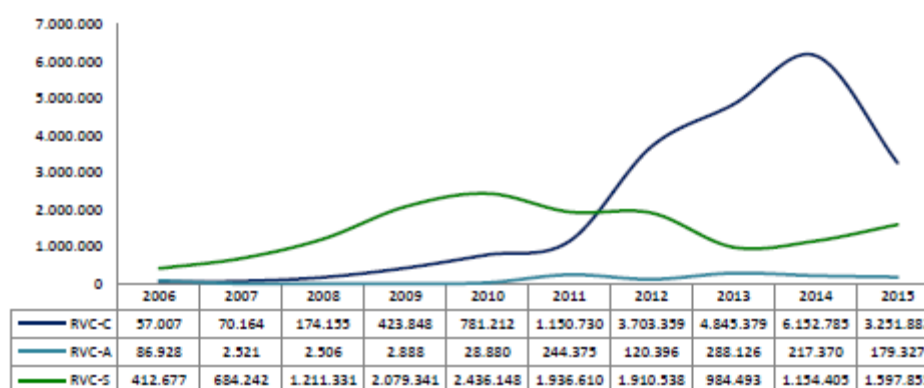


Figura 2.6 TEE riconosciuti annualmente per tipologia. Serie storiche [28].

Per avere certezza a priori dei risparmi certificati rimane la possibilità di affidarsi esclusivamente alle Schede Tecniche Standard, scartando pure le ST-A perché anch'esse necessarie di misurazioni dirette. Pianificare solamente interventi da ST-S è abbastanza irrealistico, poiché le dimensioni delle certificazioni di risparmio energetico obiettivo per il singolo ATEM sono dell'ordine delle migliaia di TEE e per arrivare a tanto - senza ricorrere all'acquisto di TEE sul mercato - l'operatore deve prevedere anche interventi di grandi dimensioni.

Infatti, analizzando le serie storiche in Figura 2.6 si evince come gli interventi a consuntivo, soprattutto dopo l'aggiornamento del meccanismo nel 2011, abbiano un ruolo di primissimo piano sul totale dei risparmi conseguiti in Italia e di conseguenza sui TEE riconosciuti. Dai dati pubblicati dal GSE per il 2014 in Tabella 2.1 emerge però che i progetti standard, vista la loro dimensione tipica rispetto a quelli valutati a consuntivo, mantengono una numerosità superiore agli interventi valutati diversamente e pertanto non possono essere trascurati da un'ipotetica pianificazione. Discorso diverso va fatto per i progetti valutati tramite ST-A: storicamente hanno sempre avuto una piccola incidenza sul totale dei risparmi generati e dei TEE rilasciati, anche se annualmente rappresentano una consistente fetta dei progetti presentati al GSE [28].

2014	CONSUNTIVA	ANALITICA	STANDARD	TOTALE
Richieste presentate	2.079	4.034	7.604	13.717
Risparmi conseguiti [tep]	2.103.858	74.793	517.925	2.696.576
TEE rilasciati	6.155.306	217.370	1.156.297	7.528.973

Tabella 2.1 Rendicontazioni di richieste di valutazione per tipo. 2014 [27].

Nel 2011 è stato rivisto il meccanismo e ciò spiega gli andamenti degli anni a seguire. La più importante modifica è stata l'introduzione del coefficiente di durabilità τ , utile ad anticipare i risparmi conseguiti negli anni successivi al termine dell'incentivo; nasce così la

discrepanza tra i TEE rilasciati e i risparmi effettivamente conseguiti dall'intervento riportati in Figura 2.7. Su questo aspetto potrebbe sorgere una prima discrepanza tra il risparmio energetico secondo normativa e il reale beneficio del paese. Se, ad esempio, un dispositivo ha una Vita Tecnica (T) di 20 anni, ma l'incentivo viene riconosciuto per una Vita Utile (U) di 5 anni, grazie al coefficiente τ l'incentivo comprenderà anche l'anticipo dei titoli corrispondenti ai 15 anni successivi alla U in cui comunque si beneficia del risparmio energetico. Questa modifica è stata introdotta per spingere su interventi più grandi e strutturali su cui difficilmente prima del 2011 si investiva in quanto il ritorno economico era scarso; a dimostrazione di quanto detto, si guardi l'impennata dei TEE rilasciati con valutazione a consuntivo dal 2012 in poi.

Attualmente il trend è in contrazione, poiché gli operatori hanno esaurito gli interventi più costo-efficaci e perché è in programma un nuovo aggiornamento del meccanismo, pertanto con buone probabilità stanno attendendo novità legislative.

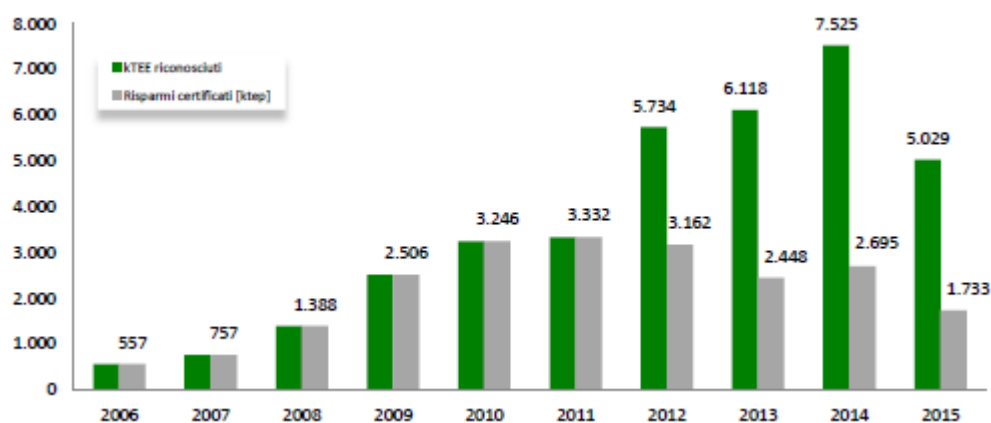


Figura 2.7 TEE riconosciuti e risparmi certificati annualmente. Serie storiche [28].

Riguardo alle ST-S, sono state proposte da ENEA delle nuove schede per il settore della serraicoltura, degli impianti termici a biomassa e dell'illuminazione. In particolare le prime due sono state ben recepite dagli operatori e il loro utilizzo ha contribuito a far crescere il trend di questo tipo di interventi.

Altre schede tecniche poco sfruttate sono state abolite a fini semplificativi.

2.4. Il calcolo del risparmio energetico

Si vuole scendere ora nel dettaglio del calcolo analitico del risparmio energetico conseguito da un progetto, per evidenziare le peculiarità della metodologia utilizzata dal GSE. Sarà utilizzata la nomenclatura stabilita dal DM 28 dicembre 2012, la quale, per omogeneità di trattazione, verrà mantenuta - per quanto possibile - anche nell'applicazione della

metodologia alternativa. Infine, si vogliono mettere in luce alcuni punti critici verso i quali l'attuale normativa non è particolarmente sensibile.

Secondo il meccanismo, italiano il risparmio energetico va quantificato su base temporale di un anno, precisamente da giugno a maggio dell'anno successivo. Non è così in tutti i meccanismi: in Francia i titoli di efficienza energetica vengono assegnati sulla base dei risparmi cumulati nell'intera vita utile e l'incentivo può essere erogato in un'unica tranche. Il risultato di questa scelta è una maggiore sicurezza da parte degli investitori, infatti si sono registrati più interventi strutturali rispetto al contesto italiano, quelli in cui i tempi di ritorno economico sono più lunghi.

Secondo le Linee Guida fornite dall'AEEGSI [27], i risparmi energetici certificati ad un intervento di efficientamento si calcolano mediante la formula generale (2.2).

$$RNI = RL \cdot \alpha \cdot \tau \left[\frac{tep}{anno} \right] \quad (2.2)$$

- *RNI*: Risparmio Netto Integrale, è il corrispettivo in *tep* dei titoli di efficienza energetica rilasciati per il progetto, fino al termine della Vita Utile dell'intervento;
- *RL*: Risparmio Lordo, è la grandezza in uscita dall'algoritmo di calcolo stabilito dal GSE nelle schede tecniche o dal proponente nel programma di misura. *RL* viene definito dall'Autorità come “la differenza nei consumi di energia primaria prima e dopo la realizzazione di un progetto” [27]. La semplificazione introdotta nelle ST-S consiste nell'attribuzione di un risparmio prestabilito per ogni dispositivo e condizione al contorno, così da avere un Risparmio Specifico Lordo (*RSL*) per ogni unità (*UFR*) su cui si interviene, secondo l'eq. (2.3).

$$RL = RSL \cdot UFR \quad (2.3)$$

- α : coefficiente di addizionalità, serve ad attribuire certificati soltanto a quei dispositivi che superano la *baseline* tecnologica o di mercato attuale. E' una prerogativa importante del meccanismo italiano e può assumere valori $0 \leq \alpha \leq 1$. Sarà pari a 1 solo quando la situazione precedente all'intervento è già al livello di riferimento del mercato. Secondo la normativa italiana è attraverso α che il risparmio diventa “netto”;
- τ : coefficiente di durabilità, necessario per anticipare i risparmi energetici conseguiti tra il termine della *U* e il termine della *T* del dispositivo. τ tiene conto di un coefficiente δ di decadimento nel tempo delle prestazioni dell'apparecchio ed è definito dalla eq. (2.4). Attraverso l'applicazione del τ il risparmio viene definito *integrale*.

$$\tau = \frac{RNI}{RNC} = \frac{\sum_{i=0}^{T-1} (1 - \delta_i)}{U} = 1 + \frac{RNA}{RNC} = \frac{\sum_{i=U}^{T-1} (1 - \delta_i)}{U} \quad (2.4)$$

Il tasso di decadimento annuo δ è un coefficiente percentuale che tiene conto in modo forfettario della riduzione media che si assume intervenga annualmente nel risparmio generato dall'intervento, in ragione di fenomeni quali il peggioramento delle prestazioni delle nuove apparecchiature installate, della necessità di manutenzione o dell'evoluzione della situazione di riferimento. δ è definito secondo la funzione (2.5).

$$\delta = \begin{cases} \delta_0 = 0\% & \text{negli anni } (0 \rightarrow U] \\ \delta_T = 2\% & \text{negli anni } (U \rightarrow T] \end{cases} \quad (2.5)$$

Non in tutte le politiche di promozione dell'efficienza energetica è presente una "svalutazione" dei risparmi conseguiti, ad esempio nel meccanismo britannico il beneficio energetico viene supposto costante nel tempo [17,18].

Anche i progetti valutati a consuntivo seguono questo schema. Il proponente deve valutare opportuni coefficienti di addizionalità e durabilità, soggetti all'approvazione del GSE.

Un progetto può ridurre i consumi energetici di diversi tipi di combustibili fossili, a seconda dell'ambito di applicazione. Per questo la normativa italiana distingue 5 tipi di TEE.

Come dimostrano i dati del GSE relativi al 1015 in Tabella 2.2, il vettore energetico su cui vengono concentrati la maggior parte dei risparmi energetici è il gas naturale (TEE di tipo II), seguito dall'elettricità (TEE di tipo I), rispettivamente con una quota del 58% e del 29%.

Infatti, storicamente, la fetta più grande dei risparmi energetici è stata conseguita con interventi sugli impianti termici, sia industriali che nel settore civile.

2015	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV	Tipo V
Industria	998.945	1.773.552	353.548	-	56
Civile	194.275	1.136.063	215.840	-	-
Illuminazione	215.937	539	76	-	-
Grandi progetti	128.240	-	-	-	-
Reti e Trasporti	82	11.911	-	-	-
Totale TEE	1.537.479	2.922.065	569.464	-	56

Tabella 2.2 TEE rilasciati per tipologia di certificato [26].

La distanza tra i TEE di I e II tipo e gli altri - rappresentanti rispettivamente altri combustibili non per autotrazione ed altri combustibili fossili nel settore dei trasporti secondo due modalità di valutazione differenti - ha condotto all'ipotesi semplificativa di considerare soltanto interventi di risparmio di gas naturale o elettricità per i casi applicativi del Capitolo 4. La normativa italiana nelle disposizioni [29,30] stabilisce i fattori di conversione dell'energia risparmiata da differenti vettori energetici in tonnellate equivalenti di petrolio a partire da rendimenti medi di centrale e poteri calorifici di riferimento. Nella presente ricerca si sono utilizzati tali valori per mantenere la coerenza di trattazione con il meccanismo italiano.

All'interno del meccanismo italiano le schede tecniche standard sono oltre 20, ognuna delle quali racchiude interventi simili per tipologia, seppur differenti a causa di condizioni al

contorno che possono generare un risparmio energetico diverso per ogni progetto. La Tabella 2.3 raccoglie gli interventi standard catalogati dalla normativa italiana ed i rispettivi parametri caratteristici [21].

Poiché la differenza fondamentale tra le metodologie di valutazione dei progetti risiede nel calcolo di RL , si vuole ora approfondire come viene stimato dalle schede tecniche. Si prendono come esempio due Schede Tecniche Standard, precisamente la ST 37E e la ST39E: nelle nuove ST-S proposte da ENEA è possibile trovare in appendice alle schede un riscontro degli algoritmi di calcolo e delle ipotesi descritti nel seguito. Sono state scelte la ST 37E e la ST 39E perché evidenziano interessanti aspetti della corrente metodologia di valutazione del risparmio energetico.

Scheda Tecnica	UFR	RSL	tipo TEE	T	U	τ	α
[tep/UFR/anno]							
ST 2T	1 abitazione	0,073	I	15	5	2,65	100%
ST 3T	1 abitazione	0,014 - 0,117	II	15	5	2,65	100%
ST 4T	1 abitazione	0,064	II	15	5	2,65	100%
ST 5T	1 mq	0,002 - 0,026	II	30	8	2,91	100%
ST 6T	1 mq	0,000 - 0,013	II / III	30	8	2,91	100%
ST 7T	1 impianto da 20kWp	3,356 - 6,927	I	20	5	3,36	100%
ST 8T	1 mq collettori	0,045 - 0,229	I / II / III	15	5	2,65	100%
ST 9T	1 kW _{nom}	0,025 - 0,244	I	15	5	2,65	100%
ST 15T	1 abitazione	0,017 - 0,308	I / II / III	15	5	2,65	100%
ST 17T	1 W _{nom}	0,0001 - 0,0002	I	15	5	2,65	100%
ST 19T	1 kW _{frigo}	0,002 - 0,004	I	15	5	2,65 / 1,87	100%
ST 20T	1 mq	0,000 - 0,001	I	30	8	2,91	100%
ST 27T	1 abitazione	0,068 - 0,111	I / II / III	15	5	2,65	100%
ST 30E	1 kW _{nom}	0,003 - 0,043	I	15	5	2,65	100%
ST 33E	1 motore	0,002 - 1,321	I	15	5	2,65	100%
ST 36E	1 kVA	0,015 - 0,166	I	10 15	5	2,65 / 1,87	100%
ST 37E	1 abitazione	0,080 - 1,030	II / III	15	5	2,65	100%
ST 38E	1 mq	0,000 - 0,005	I	10	5	1,87	100%
ST 39E	1 mq	0,000 - 0,003	II / III	30	8	2,91	100%
ST 40E	1 mq	0,003 - 0,077	II / III	15	5	2,65	100%
ST 46E	1 impianto	0,010 - 0,067	I	10 15	5	2,65 / 1,87	100%

Tabella 2.3 Schede Tecniche Standard predisposte dal GSE.

2.4.1. Scheda Tecnica Standard ST 37E

Nuova installazione di impianto di riscaldamento unifamiliare a biomassa legnosa inferiore a 35kW termici.

L'intervento riguarda il settore residenziale, come quello agricolo e terziario; vengono considerati i casi di solo riscaldamento o riscaldamento e produzione di ACS.

La ST 37E fornisce dei requisiti minimi sul rendimento di conversione della caldaia, sul rispetto delle norme di emissioni e sul combustibile utilizzato: questo è biomassa legnosa e

perciò rinnovabile. L'addizionalità prevista per questo intervento sarà unitaria, il risparmio energetico sarà praticamente pari al consumo fossile dell'impianto nella situazione *ex ante*.

Il riferimento per il calcolo del consumo specifico di combustibile fossile di baseline è tratto dall'allegato C al D.Lgs. 311 del 2006, in merito all'indice di prestazione energetica per la climatizzazione ambientale e successivamente aumentati per un rendimento di impianto (pari a 0,9) e convertiti in *tep* [31].

L'unità fisica di riferimento *UFR* è la singola abitazione tipo riscaldata, dotata di una superficie media di 91 m² [32].

Le condizioni al contorno possono essere estremamente variabili, perciò la scheda prende in esame molteplici variabili e fornisce valori di *RSL* per ogni combinazione di esse.

Le variabili principali considerate sono:

- L'intervallo di gradi giorno in cui è posizionato l'edificio, con valori intermedi presi per interpolazione lineare;
- Superficie esterna e volume dell'abitazione, legati dal rapporto *S/V* e discriminati in due classi dal valore 0,5: un'abitazione con un elevato rapporto *S/V* avrà maggiore superficie disperdente e pertanto maggiori consumi per il riscaldamento;
- Modalità di funzionamento, ovvero solo riscaldamento o riscaldamento + ACS. In questo secondo caso, ai consumi di riferimento viene aggiunto il termine *EACS*:

$$E_{acs} = \frac{E_{netta}}{\eta_{acs}} = \frac{C_{50} \cdot (50 - T_{rete})}{\eta_{acs}} \cdot 365 \cdot 10^{-7} \left[\frac{tep}{anno \cdot ufr} \right] \quad (2.6)$$

con *E_{netta}* evidentemente calcolata attraverso la norma UNI TS 11300 relativa alla prestazione energetica degli edifici, tra l'altro supponendo i valori di comfort minimi possibili;

- Integrazione con caldaia a fonte fossile e/o dipendenza del ramo di produzione di ACS da un impianto centralizzato, che andrebbero a diminuire l'efficacia del risparmio di fossili.

I valori ottenuti di *RSL* a valle delle ipotesi e dei calcoli sono medi per i 12 mesi dell'anno, pertanto la ST 37E quantifica l'energia (in tonnellate equivalenti di petrolio) risparmiata da un'abitazione nell'arco di un anno solare.

Quindi è possibile derivare la quantità di risparmi energetici certificati secondo la (2.2), che nel caso della ST 37E si traduce nella eq. (2.7).

$$RNI = RL \cdot \alpha \cdot \tau = RSL \cdot N_{UFR} \cdot 1 \cdot 2,65 \left[\frac{tep}{anno} \right] \quad (2.7)$$

2.4.2. Scheda Tecnica Standard ST 39E

Installazione di schermi termici interni per l'isolamento termico del sistema serra.

L'intervento consiste nella sostituzione - o installazione ex novo - di schermi termici a inferiore trasmittanza termica in vivai e serre, che garantiscono una minore dispersione di calore e quindi un minor consumo di combustibile fossile.

Il risparmio specifico di energia primaria Q nella ST 39E viene calcolato con l'eq. (2.8), dove il parametro chiave è $\Delta K = [W/m^2/K]$ che rappresenta il miglioramento tecnologico apportato dall'intervento.

$$Q = \frac{\Delta K \cdot (T_{int} - T_{ext}) \cdot h}{\eta_{caldaia}} \cdot 10^{-3} \quad \left[kWh / anno / m^2 \right] \quad (2.8)$$

L'altra variabile che permette di differenziare i progetti afferenti a questa scheda tecnica è l'intervallo di gradi giorno, per distinguere le zone climatiche e il numero di ore di riscaldamento della serra.

Conseguentemente l'energia primaria in kWh di gas verrà trasformata in tonnellate equivalenti di petrolio, in accordo con la [21], sulla base delle quali saranno certificati i risparmi.

2.4.3. Analisi critica delle metodologie di calcolo del risparmio energetico

Ricordando che la logica di calcolo per i progetti a consuntivo non è differente da quella dei progetti valutati con scheda tecnica, si vogliono far notare le seguenti osservazioni emerse dall'analisi delle due ST-S scelte:

- In generale il risparmio energetico certificato è l'energia primaria corrispondente alla differenza di consumi sperimentati dall'utilizzatore finale.

$$RL = \frac{(E_{ex\ ante} - E_{ex\ post})}{\eta_{trasformazione}} \quad \left[\frac{tep}{anno} \right] \quad (2.9)$$

Secondo la normativa, l'eq. (2.9) rappresenta l'energia primaria risparmiata grazie all'implementazione dell'intervento di efficientamento energetico. Il consumo di energia primaria è calcolato attraverso specifiche convenzioni ed espressi in *tep*. I fattori di equivalenza sono stabiliti dall'Autorità e sono diversi tra energia elettrica, gas naturale ed altri combustibili fossili.

L'energia risparmiata da combustibili solidi, liquidi e gassosi è già primaria e viene espressa in tonnellate equivalenti di petrolio utilizzando il rispettivo potere calorifico inferiore (PCI) [21,27].

L'energia elettrica, essendo energia secondaria, viene convertita in energia primaria attraverso il rendimento medio del parco elettrico di produzione elettrica italiana. Quest'ultimo è stato definito dall'AEEGSI nel 2008 ed è rappresentativo dell'evoluzione prevedibile del parco termoelettrico nazionale, in particolar modo tenendo conto delle tipologie di centrali utilizzate con funzione di modulazione, ovvero i cicli combinati a gas di grossa taglia [27,29].

Tuttavia, i vettori energetici forniti al consumatore finale sono prodotti da specifiche filiere produttive, che andrebbero incluse nella valutazione. Ne consegue che la reale energia primaria risparmiata dalla nazione potrebbe essere differente da quanto calcolato attraverso la relazione (2.9).

Il risparmio energetico previsto dalla normativa si focalizza solo sulla fase operativa dell'intervento, escludendo dalla valutazione la fase di produzione e di smantellamento dell'intervento stesso. Come dimostrato dalla letteratura, tali fasi del ciclo di vita potrebbero non avere un impatto trascurabile [33–35];

- In entrambe le Schede Tecniche e diffusamente nel meccanismo dei Certificati Bianchi, accanto al calcolo del risparmio energetico non è prevista alcuna valutazione di carattere ambientale (emissioni inquinanti e climalteranti).

Spesso le emissioni evitate attribuite a pratiche di efficientamento energetico sono calcolate sulla base del combustibile risparmiato che, di conseguenza, non viene bruciato direttamente [12,16,17]. Tuttavia una quota di emissioni in atmosfera proviene da attività produttive di filiera, pertanto una valutazione di tipo LCA può fornire indicazioni aggiuntive.

Analogamente al risparmio energetico, anche l'impatto ambientale andrebbe rivisto in ottica di ciclo di vita e del contesto in cui viene prodotta l'efficienza energetica.

- Da un'analisi trasversale della ST 39E, si può notare che l'installazione di schermi termici non introduce soltanto un beneficio energetico, ma influisce sulla qualità della luce che arriva alle piante, migliorandone la resa fotosintetica e potendo gestire la luce stessa in base alle coltivazioni sottostanti: questo aspetto, ovviamente non considerato dalla normativa sull'efficienza energetica, dimostra come gli strumenti incentivanti possano essere utilizzati dal legislatore per promuovere pratiche virtuose.
- Sempre con riferimento alla ST 39E, il miglioramento di trasmittanza termica ΔK non viene considerato come un intervallo di valori possibili, ma una costante. Se da una parte ciò dimostra l'utilità della Scheda Tecnica nel raggruppare progetti simili tra loro, snellendo l'attesa burocratica, dall'altra evidenzia un punto debole della normativa: il GSE attribuisce forfettariamente un certo miglioramento tecnologico - e su di esso calcola l'incentivo - mentre in realtà tale miglioramento potrebbe essere stato condotto al minimo indispensabile per accedere all'incentivo stesso. Basandosi su queste ipotesi lo Stato risparmia meno energia rispetto alle stime, non attribuisce incentivi allineati con i risparmi e inoltre non vengono premiati adeguatamente i progetti più virtuosi che vanno al di là delle ipotesi tecnologiche del GSE.

Sulla base di queste osservazioni è possibile cogliere alcune debolezze dell'attuale sistema di valutazione. Infatti, a fronte della semplicità di valutazione, tale metodo di calcolo trascura delle fasi del ciclo di vita e alcune categorie d'impatto, che potrebbero risultare non trascurabili al fine di quantificare il reale beneficio ambientale del paese.

3.

Valutazione dell'impatto ambientale dei beni e dei servizi

In questo capitolo si intende presentare lo stato dell'arte dell'analisi di ciclo di vita applicato alla valutazione dell'impatto ambientale di beni e servizi. Viene in particolare approfondito l'approccio *Input - Output*, considerato dalla letteratura la struttura computazionale della LCA.

Il presente capitolo costituisce una premessa teorica sull'analisi di ciclo di vita che per l'autore è stata fondamentale nello sviluppo del modello. Tuttavia, se il lettore lo ritiene opportuno, può proseguire la lettura del modello di valutazione applicato ai casi studio nel capitolo successivo.

3.1. Analisi del ciclo di vita

L'Analisi del Ciclo di Vita, in inglese *Life Cycle Assessment (LCA)*, è la metodologia impiegata per valutare l'impatto ambientale di un prodotto attribuibile all'insieme delle diverse fasi della sua vita, dal momento della progettazione alla dismissione, passando per il suo utilizzo.

L'impatto ambientale, in questo contesto, include le emissioni prodotte, le risorse primarie consumate, ma anche altri tipi di impatti relativi alle attività associate alla vita del prodotto. Questo implica che, seppur si sia definito "prodotto", l'LCA può essere applicato a qualunque bene fisico, servizio o decisione per i quali siano coinvolti impatti ambientali. Sta all'analista fornire una definizione coerente e univoca del prodotto all'interno della metodologia stessa.

L'LCA si pone, quindi, come fondamentale supporto per applicazioni quali lo sviluppo e il miglioramento di prodotti e processi, la pianificazione energetica e l'attuazione di politiche pubbliche. Infatti gli utilizzatori di strumenti di questo tipo, oltre al mondo della ricerca, sono sia imprese private - ad esempio multinazionali - che organismi governativi.

Se ne deduce che gli obiettivi e gli interlocutori della LCA possono essere molto differenti tra loro ed emerge, come per ogni strumento, la necessità di sviluppare un protocollo univoco. Tuttavia, sin dagli anni '70, sono stati elaborati diversi strumenti per la ricerca di uno sviluppo sostenibile e di una politica integrata dei prodotti, fino allo sviluppo di una metodologia definitiva a partire dal 1997 con la serie di norme internazionali ISO 14040 - 14043 [36–39]. Queste, strutturando le analisi del ciclo di vita in fasi comuni ed oggettive, creano il presupposto per la quantificazione e la comparazione tra beni e servizi differenti ed il conseguente loro miglioramento.

L'impostazione illustrata nelle ISO 14040 - 14043 (o ISO 14044, che le raggruppa dal 2006) viene seguita nella presente ricerca e si compone di 4 fasi come in Figura 3.1, ognuna caratterizzata da alcuni elementi chiave:

- **Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione.** Viene descritto lo scopo del lavoro, l'interlocutore dello stesso e dettagliatamente il prodotto soggetto a LCA. Un aspetto fondamentale è la definizione dell'unità funzionale, ovvero il riferimento rispetto al quale tutti i flussi devono essere tarati. Questa è necessaria per dare univocità all'analisi in ottica comparativa tra due o più prodotti. Inoltre vengono chiariti i domini spaziali e temporali del sistema di riferimento e l'affidabilità dei database considerati;
- **Analisi di inventario (LCI).** Si identificano beni e servizi coinvolti nel processo produttivo dell'unità funzionale, spesso schematizzati in diagrammi a blocchi. Quindi sono descritte le metodologie per giungere ai risultati della LCA;
- **Valutazione dell'impatto (LCIA).** Stabilisce gli impatti specifici sulla base dei quali quantificare l'impatto ambientale complessivo del prodotto analizzato e ne descrive i rispettivi indicatori a partire dai dati presenti in inventario. Alcuni autori hanno recentemente proposto la seguente suddivisione per le categorie di impatto [40]: salute umana, ambiente naturale e ambiente antropizzato, a loro volta suddivise in sottogruppi (ad esempio l'ambiente naturale, come illustrato nel Capitolo 1, si compone di combustibili fossili, acqua, suolo, atmosfera e così via). Le categorie d'impatto sono collegate tra loro, così come il prodotto è strettamente collegato ad esse.

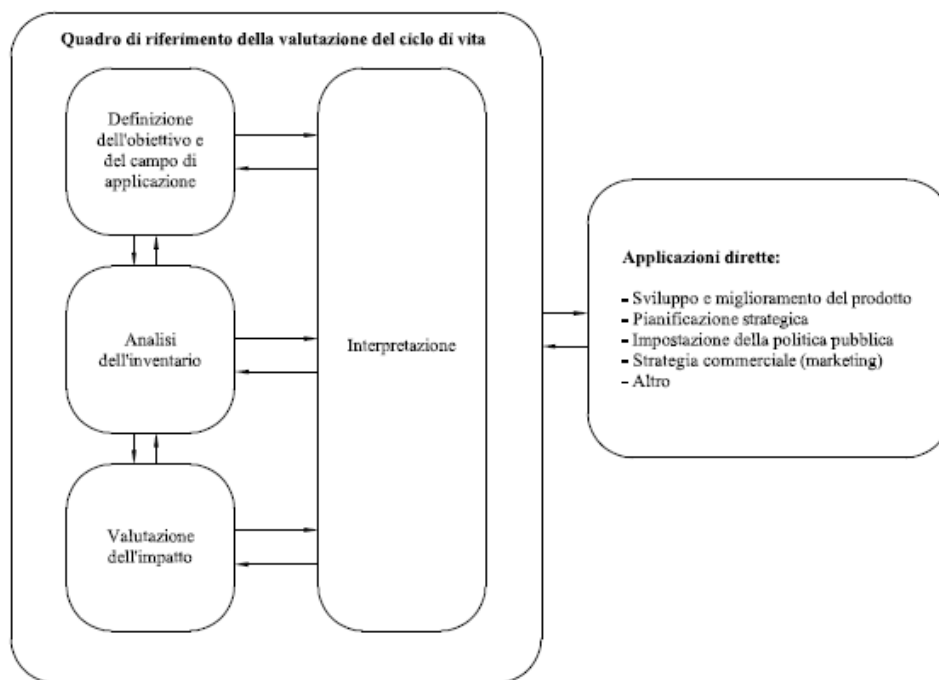


Figura 3.1 Le fasi del Life Cycle Assessment [36]

- **Interpretazione dei risultati.** E' una fase trasversale alle altre nel senso che può avvenire comparazione tra flussi della LCI in input, così come tra indicatori a valle della LCIA.

Una volta prodotti i risultati d'impatto, adeguatamente caratterizzati in precedenza, questi sono prontamente interpretabili dall'analista. Talvolta, però, è richiesta una comparazione tra indicatori differenti al fine di valutare opportunamente i *trade-off*: questo è un passaggio opzionale della fase di interpretazione e viene condotto utilizzando adeguatamente normalizzazioni e raggruppamenti di indicatori.

Col tempo l'analisi del ciclo di vita si è evoluta in uno strumento robusto e univoco, il cui grado di indagine degli impatti ambientali è sempre più completo. La valutazione è tanto più esauriente quanto più i dati a disposizione sono dettagliati, per ogni fase del ciclo di vita del prodotto. Tuttavia un tale studio può risultare a volte complesso e costoso in termini economici e di tempo [33,34]: sono stati sviluppati svariati software LCA, tarati per finalità diverse a seconda dei processi in esame. In alternativa sono stati studiati degli approcci semplificati di LCA, sufficientemente affidabili e adeguati quando i dati a disposizione non consentono uno studio dettagliato.

L'affidabilità degli approcci semplificati è favorita dalla disponibilità, sempre maggiore negli anni recenti, di database ambientali, energetici ed economici che siano accreditati e liberamente fruibili dagli analisti. Tipicamente, infatti, la fase più dispendiosa del LCA è l'analisi di inventario, proporzionalmente al grado di dettaglio e di incertezza con cui la si intende condurre.

Le differenti strategie di semplificazione del LCA dipendono soprattutto dall'obiettivo del lavoro, ma si raggiungono attraverso due strade principali:

- Semplificazione dell'analisi di processo - *process-LCA* - da cui si ricavano valutazioni qualitative, utili in particolare nei confronti tra prodotti, o semi-quantitative, che fanno uso di pesi e dell'aggregazione degli indicatori;
- L'utilizzo dell'*Analisi Input - Output*. Benché nata per essere applicata a economie nazionali, consente di indagare l'impatto ambientale di un prodotto in modo quantitativo, considerandone l'intera filiera di produzione e basandosi su database di flussi economici registrati dagli istituti statistici nazionali.

Ognuno dei due approcci illustrati è caratterizzato da punti di forza e debolezze [33,34,41].

Le fonti dei dati provengono rispettivamente da singoli processi o da intere economie nazionali, per le quali il processo unitario è il settore industriale. Questo è composto dall'aggregazione di più processi tecnologici. Di conseguenza i flussi dei beni scambiati saranno descritti da unità fisiche o unità monetarie.

Un'altra differenza riguarda le fasi del ciclo di vita considerate entro i confini dell'analisi. Gli approcci utilizzati nella LCA sono tendenzialmente due, i cosiddetti "*from cradle to grave*" e "*from cradle to gate*". Il primo segue il prodotto dal primo all'ultimo istante della sua vita, mentre il secondo si limita alle fasi iniziali fino alla consegna del prodotto finito al consumatore finale.

La valutazione pratica del consumo totale di risorse e dell'impatto ambientale richiede preliminarmente la definizione di due elementi chiave:

- Dominio spaziale, dipende fortemente dal tipo di sistema analizzato;
- Dominio temporale, ovvero l'intervallo di tempo nel quale vengono registrati i flussi in ingresso e uscita. Solitamente viene scelto un intervallo di un anno per condurre le analisi.

Infine, è stata sviluppata anche una terza metodologia, che fonde aspetti dell'analisi di processo con l'approccio *Input - Output*: l'*analisi Input - Output Ibrida*.

L'analista deve scegliere l'approccio più corretto sulla base delle caratteristiche del caso in esame. In questa tesi si vuole studiare in ottica di *ciclo di vita* un generico intervento di efficienza energetica, realizzato in Italia. Lo strumento computazionale che si è ritenuto più adatto al presente studio è l'*Analisi Input - Output Ibrida* poiché garantisce alcune importanti caratteristiche:

- Una buona caratterizzazione del processo analizzato;
- Una oggettiva definizione dei confini spaziali del sistema;
- Risultati di tipo quantitativo che consentono una comparazione tra gli interventi esaminati.

Nel seguito del presente capitolo verranno introdotti il modello matematico e le peculiarità dell'*analisi Input - Output* e verrà presentata la struttura teorica del modello ibrido; ogni passaggio sarà finalizzato all'adattamento di questo specifico strumento allo studio dell'efficienza energetica.

3.2. Analisi Input - Output

L'*analisi Input - Output* è il modello analitico sviluppato alla fine degli anni '30 dello scorso secolo da Wassily Leontief al fine di analizzare le interdipendenze settoriali all'interno di una determinata economia [5,35,42]. Questo lavoro, teorizzato ad Harvard, gli valse il Nobel nel 1973. Lo stesso comitato del premio Nobel affermò che "*Il suo metodo analitico è diventato una componente permanente dei processi di pianificazione e previsione della produzione nelle economie industrializzate e nelle imprese private di tutto il mondo*".

Dagli ultimi anni del XX secolo il quadro originale della IOA è stato rivisitato per essere sfruttato in altri ambiti di ricerca, in cui le interdipendenze settoriali tessono comunque la trama di fondo. E' il caso dell'occupazione, le esternalità ambientali legate alle attività produttive, le risorse energetiche, i flussi commerciali e così via [42,43]. Attualmente la *Input - Output Analysis* è uno degli strumenti più largamente diffusi sia nel campo dell'economia classica che per l'analisi dell'impatto ambientale [5,33,35,44].

L'analisi energetica per mezzo della IOA ha origine dagli studi di Wright (1974) e Bullard e Herendeen (1975) con l'obiettivo di indagare l'intensità energetica dei settori di una determinata economia nazionale.

La Figura 3.2 mostra come in una generica struttura produttiva, composta da settori energetici e non, le risorse primarie entrino soltanto nei primi, mentre il prodotto finale assorbe energia sia *direttamente* che *indirettamente* [45].

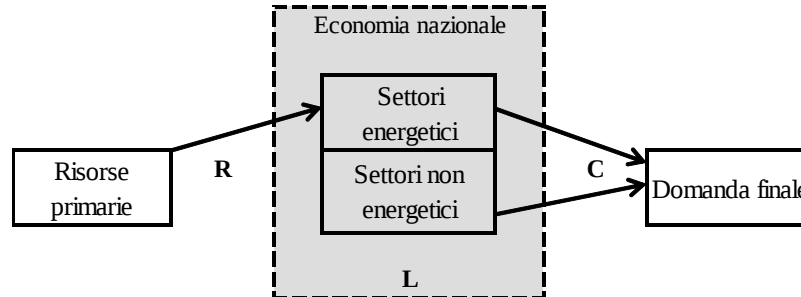


Figura 3.2 Flussi energetici in una generica economia nazionale [45].

Ogni attività dell'uomo necessita di risorse naturali: le attività economiche, come la produzione di beni e servizi, possono assorbire tali risorse naturali *direttamente* dall'ambiente, ma anche *indirettamente* poiché consumano a loro volta beni prodotti, trasformati o scambiati da altre attività. Il consumo di risorse all'interno di un'economia dipende quindi da entrambi i casi.

Gli studi sull'analisi dell'impatto ambientale attraverso il modello di Leontief sono successivi e seguono la medesima struttura logica [33,46,47]. Al fine di evitare imprecisioni a livello contabile e rendere possibili comparazioni tra sistemi diversi, è particolarmente importante che vengano definite in modo univoco gli indicatori d'impatto considerati, mentre sui domini temporali e spaziali è lasciata maggiore arbitrarietà alla scelta del ricercatore. Con questo obiettivo sono stati sviluppati appositi database per la contabilità ambientale sufficientemente omogenei per ipotesi di fondo.

3.2.1. Definizione generale

Per addentrarsi nella formulazione dello strumento al centro di questo lavoro, è necessario preliminarmente fornire alcune definizioni generali.

Con riferimento alla Figura 3.3 si consideri un sistema produttivo (area ombreggiata) che produce una domanda finale f_i (chiamata anche *unità funzionale*) e che riceve in input delle risorse esogene r . Il generico sistema produttivo può essere composto da uno o più processi, tra i quali vengono scambiati prodotti intermedi x_{ji} .

Le risorse esogene in input afferiscono a ogni processo e la loro somma rappresenta l'intero fabbisogno del sistema produttivo, secondo l'eq. (3.1).

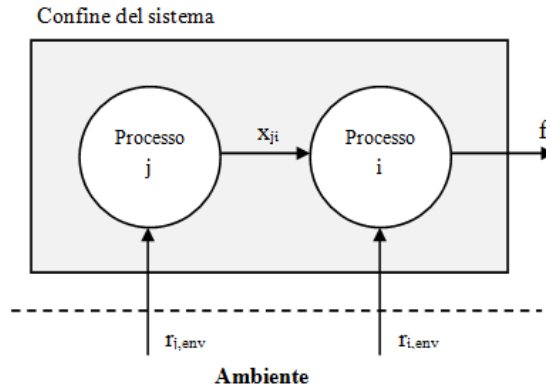


Figura 3.3 Sistema produttivo a due processi e interfaccia con l'ambiente [5].

$$r_{tot} = \sum_{\text{processi}} r_{env} = (r_{j,env} + r_{i,env}) \quad (3.1)$$

Per quanto concerne i domini spaziale e temporale, nel caso in esame risulta utile optare per una finestra temporale di un anno e porre il confine del sistema direttamente sull'ambiente. Questa è la scelta più corretta per analizzare le intere economie nazionali: così facendo le risorse in ingresso sono, per definizione, risorse primarie.

Il consumo di risorse del processo i -esimo è definito come il rapporto tra flussi assorbiti e in uscita dal processo stesso, secondo l'eq. (3.2)

$$k_{i,env} = r_{i,env} / f_i \quad (3.2)$$

Un'analisi di ciclo di vita intende valutare il costo complessivo - o *impatto ambientale* - della domanda finale in termini di risorsa consumata, secondo l'eq. (3.3). Bisogna prestare particolare attenzione al termine *costo*: nell'analisi *Input - Output* indica la quantità di risorse totali utilizzate da un sistema e non deve essere confuso con il costo economico. In questa tesi, onde evitare fraintendimenti, tale definizione verrà genericamente chiamata *impatto ambientale*.

$$c_{env,i} = (r_{i,env} + r_{j,env}) / f_i \quad (3.3)$$

L'obiettivo di contabilizzare i *costi* come nella IOA è proprio di quantificare l'ammontare di risorse esogene complessivamente allocate all'unità funzionale del sistema produttivo in esame, ovvero sulla domanda finale f_i . Pertanto debbono essere considerate sia le risorse assorbite direttamente $r_{i,env}$ che quelle assorbite indirettamente $r_{j,env}$ dai processi posti lungo la filiera.

Come rappresentato nella Figura 3.4 un sistema produttivo complesso è composto da n processi, ognuno dei quali ha in ingresso risorse primarie ed in uscita il proprio prodotto. Per l'identificazione dei costi diretti e indiretti è necessario l'approccio *Input - Output* teorizzato da Leontief.

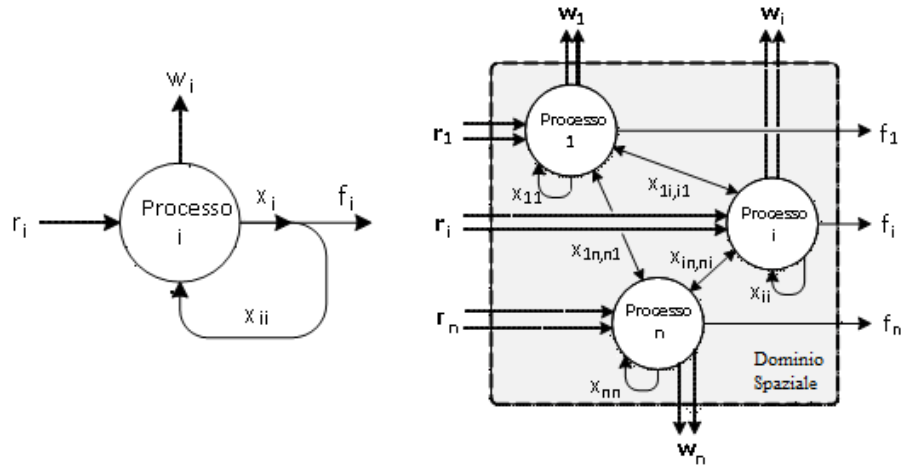


Figura 3.4 Flussi in ingresso e in uscita per un singolo processo e per un sistema di processi produttivi

Il bilancio di produzione condotto sul singolo processo i è descritto dall'eq. (3.4).

$$x_i = x_{ii} + f_i \quad (3.4)$$

Passando ad un sistema complesso, emerge l'esistenza di flussi intermedi x_{ij} tra il processo produttivo i ed il processo j e del suo duale x_{ji} . Pertanto il bilancio di produzione complessivo, costituito da n equazioni, può essere rappresentato in forma matriciale dall'eq. (3.5).

$$\mathbf{x} = \mathbf{Zi} + \mathbf{f}$$

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & x_{nn} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{i} (n \times 1) + \begin{bmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Nel seguito della trattazione teorica l'approccio IO è condotto esclusivamente in notazione matriciale poiché la presente ricerca è finalizzata a valutare un sistema complesso.

3.2.2. Il modello di Leontief

Il *Modello di Produzione di Leontief* (LPM) è lo schema analitico che consente di condurre valutazioni sulla filiera di un processo produttivo e viene utilizzato valutare l'*impatto ambientale* del prodotto finale.

La Figura 3.4 e il sistema di equazioni (3.5) descrivono un sistema produttivo complesso:

- n è il numero di processi i -esimi che compone il generico sistema;
- m è il numero di risorse esogene in ingresso nel sistema;

- p è il numero di flussi di scarto uscenti dal sistema;
- $\mathbf{x}(n \times n)$ è il vettore di produzione totale;
- $\mathbf{Z}(n \times n)$ è la matrice che contiene i flussi intermedi x_{ij} ;
- $\mathbf{f}(n \times 1)$ è il vettore di domanda finale;
- $\mathbf{R}(m \times n)$ è il vettore delle m risorse esogene in ingresso al sistema dall'ambiente;
- $\mathbf{W}(p \times n)$ è il vettore che rappresenta i flussi in uscita dal sistema verso l'ambiente, intesi come reflui di processo, emissioni o scarti.

Il primo passo dell'LPM è il calcolo della *matrice dei coefficienti tecnici* $\mathbf{A}$ dove ogni elemento rappresenta l'input diretto richiesto dal processo j , proveniente dal processo i , per ottenere un'unità di prodotto x_j . Nell'eq. (3.6) la notazione $\hat{\mathbf{x}}$ rappresenta la matrice diagonale che contiene il vettore $\mathbf{x}$ sulla diagonale principale.

$$\mathbf{A}(n \times n) = \mathbf{Z}\hat{\mathbf{x}}^{-1} \quad (3.6)$$

$$\begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & x_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1/x_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 1/x_n \end{bmatrix}$$

Sostituendo l'eq. (3.6) nella (3.5) e manipolando opportunamente le matrici si arriva alle eq. (3.7), (3.8) che sono il cuore dell'LPM: il termine che moltiplica la domanda finale nell'eq. (3.8) è la *Matrice Inversa di Leontief* (in inglese *Leontief Inverse Matrix*) (3.9) e ogni suo elemento rappresenta l'ammontare di prodotto i -esimo consumato sia direttamente che indirettamente dal j -esimo processo per ottenere la domanda finale.

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}\mathbf{i} + \mathbf{f} \quad \rightarrow \quad \mathbf{x} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{f} \quad (3.7)$$

$$\mathbf{x} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{f} \quad (3.8)$$

$$\mathbf{L} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \quad (3.9)$$

Il calcolo della matrice $\mathbf{L}(n \times n)$ è il passaggio chiave della IOA, ma i significati fisico ed economico dei coefficienti al suo interno potrebbero non essere immediati da cogliere. Inoltre è necessario chiarire l'approccio scelto in fase di elaborazione dei risultati.

La produzione di un'unità di domanda finale richiede il consumo di una quantità di prodotto a_i , proveniente dal medesimo processo i : in precedenza a_i sarà stata prodotta dal processo ed ora viene autoconsumata. Ogni processo i -esimo richiede un quantità r_i di risorse in ingresso per soddisfare la domanda finale.

Risalendo la catena di processi, le risorse esogene impiegate sono infinitesimi di ordine di grandezza inferiore e possono essere matematicamente rappresentate da una serie di potenze, come nell'eq. (3.10).

$$1 + \underbrace{a_i + a_i^2 + a_i^3 + \cdots}_{\substack{\text{input} \\ \text{indiretti}}} = \sum_{n=0}^{+\infty} a_i^n = (1 - a_i)^{-1} \quad (3.10)$$

input diretti

$$\mathbf{I} + \mathbf{A} + \mathbf{A}\mathbf{A} + \mathbf{A}\mathbf{A}\mathbf{A} + \dots = \sum_{n=0}^{+\infty} \mathbf{A}^n = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \quad (3.11)$$

Se il sistema è composto da n processi, lo schema viene esteso e trattato matricialmente secondo la (3.11). Se si volessero applicare le equazioni (3.6), (3.8), (3.9) ad un sistema complesso, soprattutto se descritto da matrici dense, ci si imbatterebbe in elevati tempi di calcolo e problemi di instabilità numerica della soluzione [5]. La serie di potenze in forma matriciale dell'eq. (3.11) è il procedimento utilizzato operativamente nel Capitolo 4. Dall'implementazione della (3.11) con gli adeguati strumenti di calcolo deriva un certo valore residuale che, nello svolgimento del modello di Leontief, non consente la chiusura esatta del bilancio tra risorse impiegate e *costi* totali. Per la scelta del valore residuo della serie va accettato un compromesso tra tempi computazionali e precisione dei bilanci.

Facendo di nuovo riferimento alla Figura 3.4 la produzione totale del sistema richiede delle risorse $\mathbf{R}$ in ingresso e causa degli scarti $\mathbf{W}$. Il modello di Leontief consente di valutare l'impatto totale del sistema in esame alla risorsa esogena considerata. Tale grandezza viene espressa coerentemente con l'unità di misura più indicata a quantificare la risorsa.

Le risorse esogene provenienti dall'ambiente sono descritte dall'eq. (3.12). Tipicamente sono annoverati combustibili fossili - genericamente energia - ma anche acqua, suolo, metalli, manodopera e ore di lavoro.

$$\mathbf{R}(m \times n) = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \begin{matrix} \text{energia} \\ \text{acqua} \\ \dots \end{matrix} \quad (3.12)$$

Il modello di Leontief consente di trattare i flussi di scarto $\mathbf{W}$ in modo analogo alle risorse esogene. Per flussi di scarto si intendono i prodotti “collaterali” che dal sistema vengono rilasciati in ambiente, ad esempio acque reflue, gas inquinanti, scarti di produzione. Per semplificare la trattazione, da qui in avanti verranno chiamate genericamente *risorse esogene* anche le grandezze che fisicamente rappresentano dei flussi di scarto: in questo modo è possibile valutare contestualmente l'*impatto ambientale globale* di un sistema in termini di risorse primarie consumate, emissioni generate o altri inquinanti prodotti. La matrice di risorse esogene $\mathbf{R}$ (3.13) avrà dimensione complessiva k .

$$\mathbf{R}((m+p) \times n) = \begin{bmatrix} \mathbf{R}(m \times n) \\ \mathbf{W}(p \times n) \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$k = m + p$$

Dividendo le k risorse esogene per la produzione totale si ricava la *matrice degli input* (o *input matrix*) $\mathbf{B}$ (3.14)

Gli elementi di $\mathbf{B}$ rappresentano l'ammontare di risorse esogene, suddivise nelle k diverse tipologie, direttamente richieste per la produzione di un'unità di prodotto da ogni processo i .

$$\mathbf{B}(k \times n) = \mathbf{R}\hat{\mathbf{x}}^{-1}$$

$$\begin{bmatrix} b_{11} & \cdots & b_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{k1} & \cdots & b_{kn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{k1} & \cdots & r_{kn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1/x_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 1/x_n \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$\mathbf{e}(n \times k) = (\mathbf{BL})^T \quad (3.15)$$

Richiamando il modello di produzione, è possibile ricavare un *costo* specifico che esprime l'impatto ambientale $\mathbf{e}$ (3.15) diretto ed indiretto del sistema per unità di domanda finale, in funzione dei k impatti considerati.

Essendo $\mathbf{e}$ relativo alla domanda finale $\mathbf{f}$, l'impatto ambientale totale $\mathbf{E}$ sarà descritto dall'eq. (3.16).

$$\mathbf{E}(n \times k) = \hat{\mathbf{f}} \mathbf{e} \quad \rightarrow \quad \mathbf{E} = \hat{\mathbf{f}} (\mathbf{BL})^T \quad (3.16)$$

$\mathbf{E}$ è una quantità estensiva e conservativa, pertanto la somma delle risorse esogene assorbite dal sistema è pari alla somma dell'impatto ambientale totale dei suoi prodotti, come mostrato dal bilancio (3.17).

$$\begin{aligned} \mathbf{i}(1 \times k) \cdot \mathbf{R}(k \times n) \cdot \mathbf{i}(k \times 1) &= \mathbf{R}_{\text{tot}} \\ \mathbf{i}(1 \times k) \cdot [\mathbf{i}(1 \times n) \cdot \mathbf{E}(n \times k)]^T &= \mathbf{E}_{\text{tot}} = \mathbf{R}_{\text{tot}} \end{aligned} \quad (3.17)$$

L'impatto ambientale totale $\mathbf{E}$ di un prodotto è quindi la somma dell'impatto ambientale associato alla produzione dei beni e servizi di cui necessita e dell'impatto diretto associato alla propria produzione [48].

Un'ulteriore tipo di risorsa, seppur non ricorrente nell'analisi dell'impatto ambientale, è il lavoro umano. Questo non è un flusso che proviene direttamente dall'ambiente e questo ne rende controversa la trattazione. Tuttavia un'ora di lavoro richiede a sua volta energia, beni e servizi, diventando fonte di ulteriore impatto ambientale non trascurabile [5]. Il capitale umano può essere quantificato con il numero di manodopera impiegata, con le ore di lavoro richieste o altri indicatori e può essere trattata come una risorsa, similmente a quanto viene fatto con il capitale naturale.

Illustrata l'impalcatura analitica fondamentale per l'analisi *Input - Output*, si vogliono evidenziare alcuni aspetti caratteristici chiave per l'implementazione pratica del modello.

3.2.3. Assunzioni fondamentali

L'analisi *Input - Output* prevede alcune assunzioni basilari:

- Ogni processo genera in output un unico prodotto, mentre sono molteplici i flussi che può assorbire in ingresso e rilasciare come scarti. L'unicità del prodotto è fondamentale per la sussistenza matematica del modello. Se un processo produce più output (ad es. un processo chimico che produce più reagenti) è necessario che questi

siano contabilizzati con un'unità di misura univoca (*kWh*, *kg*, *\$*,*€*,...) così da poter essere contabilizzati in modo univoco [5,42,49].

- Nei sistemi produttivi estesi la compilazione pratica delle tavole IO sarebbe difficoltosa se non venisse tollerato un certo grado di aggregazione dei processi simili tra loro. Nello studio di un'economia nazionale i processi vengono aggregati in *settori virtuali* che a loro volta, uniti insieme, riassumono l'economia di uno Stato (ad es. tutti gli impianti di un paese che producono energia termica ed elettrica finalizzati alla distribuzione vengono aggregati nel settore virtuale *Distribuzione di Energia*: i prodotti di quest'ultimo potranno essere misurati tutti in energia e non rispettivamente in tensione e volume di gas). Tanto più l'aggregazione è spinta, tanto più si perderà risoluzione di analisi. La scelta dipende principalmente dal tipo di valutazione che si vuole condurre e dal tipo di sistema che si sta analizzando.
- Il modello sfrutta un'algebra lineare, perciò si verificano ritorni di scala costanti. Fisicamente significa che la tecnologia non cambia all'interno del dominio temporale stabilito e, analiticamente, che i coefficienti tecnici in **A** e di input in **B** sono costanti. Questa ipotesi è importante nello studio degli *shock* di domanda finale e nella maggior parte dei casi reali è verificata. Si immagini un grande sistema produttivo in cui la dimensione dello *shock* di domanda è ben distante dal valore della produzione totale del processo: nell'intervallo temporale considerato le tecnologie produttive non vengono cambiate, ma subiscono soltanto una contrazione o espansione della produzione totale con un conseguente e proporzionale adattamento delle risorse necessarie in input e degli scarti.

3.2.4. Potenzialità dell'analisi Input - Output

Come evidenziato anche dalla commissione del Nobel nel 1973, la IOA è uno strumento frequentemente utilizzato dai policy maker di tutto il mondo - oltre che dal mondo accademico - in fase di pianificazione economica e previsione degli scenari. Attraverso il modello di Leontief è possibile studiare diversi tipi di situazione [42,50,51].

Effetti dovuti a shock di domanda finale

Viene definito *shock* per rendere chiara l'assunzione che le tecnologie produttive non si adattano alla variazione di domanda finale (3.18), ma conservano le efficienze produttive e i medesimi consumi intermedi tra processi. Ciò si traduce nelle condizioni (3.19).

$$\Delta \mathbf{f} = \mathbf{f}_1 - \mathbf{f}_0 \quad (3.18)$$

$$\mathbf{L} = \text{costante} ; \mathbf{B} = \text{costante} \quad (3.19)$$

$$\Delta \mathbf{x} = \mathbf{L} \Delta \mathbf{f} \quad (3.20)$$

$$\Delta \mathbf{E} = \Delta \hat{\mathbf{f}} (\mathbf{B} \mathbf{L})^T \quad (3.21)$$

Come conseguenza la produzione totale **x** varia secondo l'eq. (3.20) e l'impatto ambientale totale della domanda finale secondo l'eq. (3.21). E' da notare che, a differenza di

quest'ultimo, l'impatto specifico (3.15) non subisce variazioni, in quanto dipendente dalle efficienze tecnologiche di produzione.

L'accuratezza dei risultati va di pari passo con la validità dell'ipotesi sui rendimenti di scala costanti: se lo *shock* Δf è sensibile rispetto alla dimensione della produzione totale, allora sarà probabile che le tecnologie di produzione subiscano variazioni di efficienze di conversione (proprio come una turbina a gas peggiora il suo rendimento quando non viene utilizzata nelle condizioni di progetto a causa della diminuzione di domanda, sottratta dalla produzione fotovoltaica).

Effetti dovuti a shock tecnologici

Lo *shock* tecnologico è il caso duale dello *shock* di domanda finale e come tale sarà tanto più valido quanto più il sistema in esame è grande. In questo caso il cambio efficienza di una o più tecnologie del sistema produttivo in esame si riflette sulla matrice dei coefficienti tecnologici e degli input generando una variazione della L . Conseguentemente sia la produzione totale x che l'impatto ambientale complessivo E saranno modificati a causa delle variazioni dell'impatto specifico e , relativo alla domanda finale [5,42,50,51].

A seconda del caso in esame bisogna capire se l'ipotesi sui rendimenti di scala costanti possa essere ritenuta valida o meno e indirizzare l'analisi sulle due strade appena illustrate. La variabilità sia di domanda finale che di efficienze tecnologiche introdurrebbe due gradi di libertà che non consentono di ottenere risultati affidabili e univoci utilizzando la IOA come strumento [42,50].

Approccio di pianificazione

L'impalcatura che sostiene il modello di Leontief è formata da sistemi di n bilanci di produzione in n incognite. Ciò permette all'analista di giungere rapidamente a soluzioni univoche, ma anche di estendere la IOA a situazioni di pianificazioni [42,49].

La IOA può essere adattata a programmazione lineare (LP) fissando una funzione obiettivo e rilassando il vincolo di uguaglianza nei bilanci produttivi, vale a dire che la produzione totale x almeno soddisfi la domanda finale, come illustrato nel sistema (3.22).

$$\begin{aligned} F_{obj} = \min z &= f(x_1, x_i, x_n) \\ \left\{ \begin{array}{l} x_1 \geq x_{11} + \dots + x_{1j} + \dots + x_{1n} + f_1 \\ \vdots \\ x_i \geq x_{i1} + \dots + x_{ij} + \dots + x_{in} + f_i \\ \vdots \\ x_n \geq x_{n1} + \dots + x_{nj} + \dots + x_{nn} + f_n \end{array} \right. \end{aligned} \quad (3.22)$$

L'approccio di pianificazione del modello di Leontief viene utilizzato:

- Per analisi di natura economica, in cui la funzione obiettivo può essere la minimizzazione della domanda finale totale (GNP) al fine di incrementare le quantità destinate all'export [52];
- Per implementare scenari di politica energetica [53,54]: si esaminano accuratamente le risorse primarie in ingresso al sistema paese e, sottostando a determinati vincoli di produzione del tipo (3.22), si minimizza la dipendenza dalle importazioni di fossili.

Estendendo il medesimo approccio si giunge alla *Programmazione Lineare MultiObiettivo* (MOLP), ad esempio si può ricercare la soluzione che sia il compromesso ottimo tra indipendenza energetica, emissioni inquinanti evitate, GDP del paese: sono i cosiddetti *E3 objectives* (*Energy, Economy, Environment*) [42,53]. In questo modo si fornisce uno strumento di assistenza alle decisioni per il policy maker, che può scegliere quale obiettivo privilegiare orientandosi verso la soluzione non dominata di una funzione o delle altre.

In questa tesi l'assunzione fondamentale è che il risparmio di energia agli usi finali sia una pari diminuzione di domanda finale per il settore di pertinenza. Ne deriva che, delle tre applicazioni esaminate, ci si affidi alla valutazione dello *shock* di domanda finale Δf per quantificare la variazione ΔE sull'intero sistema paese causato dall'efficientamento energetico.

La seconda delle applicazioni possibili non è percorsa in primo luogo per via delle dimensioni dell'intervento stesso: è lecito pensare che un singolo intervento non vada a modificare l'efficienza tecnologica di produzione di un intero settore dell'economia nazionale.

Utilizzare la IOA in fase di pianificazione è probabilmente lo scopo più ambizioso ma al tempo stesso complesso: applicarlo in questo lavoro sarebbe stato teoricamente possibile, ad esempio associandolo al contesto delle gare di affidamento degli ATEM di distribuzione di gas naturale: ad esempio, si potrebbe indagare il mix di interventi di efficientamento energetico ottimo massimizzando il beneficio energetico, l'impatto sociale e ambientale del paese. Gli ostacoli sono però notevoli: da una parte la determinazione dei vincoli sulle utenze a disposizione nel territorio, dall'altra la necessità di avere una database aggiornato su cui lavorare e con la risoluzione al singolo ATEM.

Inoltre, come emerge dal Capitolo 2, il principale *driver* di scelta per il produttore di efficienza sia il massimo profitto. Infatti, la MOLP viene solitamente utilizzata dal decisore politico e mai dal privato [42,53,54]. Se, ad esempio, dal policy maker italiano venisse incoraggiata una valutazione più sistemica degli interventi di efficienza energetica allora ci si potrebbe rivolgere ad uno strumento di questo tipo con maggiore concretezza.

3.3. Analisi Input - Output delle economie nazionali

Si è visto nella definizione del modello *Input - Output* che l'unità di misura dei flussi contabilizzati nelle tavole deve essere omogenea, soprattutto per i prodotti. Mantenendo la coerenza è comunque possibile rappresentare i processi produttivi attraverso flussi materiali o monetari. Con i primi vengono costruite le cosiddette PIOT (*Physical Input - Output Table*): vengono utilizzate solitamente per piccoli sistemi produttivi perché perdono di affidabilità quando i flussi in gioco sono numerosi [5,42,55]. Misurarli in tonnellate, energia o unità,

rende difficile cogliere tutti quei flussi immateriali tipici di un'economia reale e spesso responsabili di impatti ambientali non trascurabili. L'alternativa alle unità fisiche è di esprimere ogni flusso tramite un corrispettivo monetario.

3.3.1. Tavole Input - Output monetarie

Per considerare coerentemente tutti i flussi in gioco, materiale ed immateriale, questi vengono espressi secondo il loro valore monetario. Ogni prodotto ha un proprio valore economico: solitamente le tavole sono compilate ai prezzi base al valore corrente - con finestra temporale di un anno -, riferito al consumatore finale poiché il prodotto è domanda finale [56]. Sin dal lavoro pionieristico di Leontief, l'analisi *Input - Output* ha avuto lo scopo di analizzare le interdipendenze settoriali all'interno di una data economia: le tavole monetarie (MIOT) sono lo strumento ideale per tale finalità; le analisi di ciclo di vita condotti attraverso l'uso delle MIOTs sono chiamati in inglese *Economic Input - Output LCA analysis* (EIO-LCA) [46,48]. Le principali caratteristiche positive e negative delle MIOT sono:

- Lo standard di *accounting* internazionalmente conosciuto. La contabilità delle nazioni viene annualmente registrata dagli istituti statistici nazionali seguendo la convenzione ufficiale SNA (*System of National Accounts*) [57];
- La disponibilità di tavole aggiornate e affidabili nei dati che le compongono;
- Le economie nazionali vengono suddivise per attività o per prodotti o, ancora, un mix dei due quando si vuole considerare la produzione congiunta [58];
- L'aggregazione delle attività produttive in settori economici [59,60]. E' un compromesso necessario per studiare grandi sistemi reali come le economie nazionali, ma l'analisi perde di precisione all'aumentare del grado di aggregazione;
- L'attribuzione dell'equivalente monetario di un determinato prodotto. Si possono incontrare difficoltà sia nel ricavare il prezzo corrente del prodotto nell'anno di analisi e sia nell'approssimazione di più prodotti simili uscenti dai processi produttivi aggregati insieme in un unico prodotto "medio";
- La contabilizzazione dei servizi non destinati al mercato [58];
- Il trattamento dei flussi commerciali tra economie nazionali.

Nella presente ricerca si utilizza la suddivisione per attività economiche (*branca per branca*) che genera una tavola simmetrica dell'economia nazionale. Le attività produttive che la compongono sono aggregate tramite la catalogazione riconosciute a livello internazionale *International Standard Industrial Classification of All Economic Activities* (ISIC) [59] che si articola in classi, gruppi e divisioni.

Come rappresentato in Figura 3.5, una tavola monetaria è formata da una matrice $\mathbf{Z}(n \times n)$, dove n è il numero di settori economici previsti dallo standard di classificazione, un vettore di domanda finale $\mathbf{f}(n \times q)$ che rappresenta i consumi finali della nazione e, secondo il bilancio (3.5), un vettore $\mathbf{x}(n \times 1)$ di produzione totale di ogni settore economico. In questo caso viene considerata la sola produzione endogena della nazione.

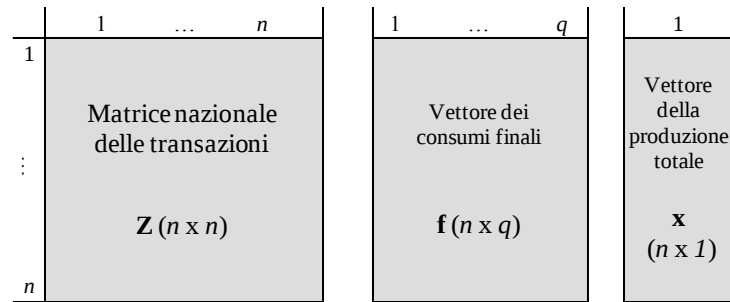


Figura 3.5 Tavola nazionale in unità monetarie (MIOT).

La domanda finale è suddivisa in q destinazioni, rappresentanti rispettivamente [58,61]:

- Spesa per consumi finali delle famiglie
- Spesa per consumi finali delle istituzioni sociali
- Spesa per consumi finali delle aziende private
- Investimenti lordi (spese pubbliche)
- Esportazioni

Per le finalità di questo lavoro ci si limita a considerare una domanda finale totale che racchiude tutte le voci suddette, secondo la (3.23).

$$\mathbf{f}_n (n \times 1) = \sum_q \mathbf{f}_{n,q} \quad (3.23)$$

L'ultimo degli ostacoli elencati, che si incontra studiando le economie nazionali attraverso la IOA, è il trattamento dei flussi commerciali tra nazioni. Questo può generare imprecisioni nei risultati e necessita di un approfondimento dedicato.

3.3.2. L'influenza del trattamento dei flussi commerciali

La definizione del dominio spaziale della MIOT è un aspetto cruciale per una corretta valutazione dei costi dei prodotti finali di una nazione. Una quantità sempre più rilevante di beni e servizi viene scambiata tra le nazioni del mondo: l'energia e l'impatto ambientale associati ad essi dovrebbero essere correttamente quantificati.

L'analisi dettagliata di un'economia nazionale attraverso la MIOT prevede una contabilizzazione dei flussi di prodotti importati ed esportati, come in Figura 3.6.

- Importazioni. L'energia totale, ad esempio, consumata dalla domanda finale di un'economia nazionale non deriva soltanto dall'energia primaria estratta nel paese stesso, ma comprende anche quella utilizzata per estrarre, trasformare e trasportare il beni importati. Nella MIOT nazionale i flussi di import possono essere contabilizzati come consumi intermedi o come domanda finale.

- Esportazioni. All'interno della MIOT le esportazioni sono contabilizzate come domanda finale, ma non è detto che questi non siano beni destinati al consumo intermedio. Si pensi, ad esempio, alle esportazioni di combustibili fossili da parte della Russia: dalla MIOT 2010 [62] soltanto lo 0,5% della domanda finale relativa al settore *Mining and Quarring* è destinato al consumo interno, la quasi totalità è destinata all'export. E tipicamente in uscita da questo settore vi è un prodotto utilizzato nei consumi intermedi, per alimentare il settore industriale o della distribuzione di energia. Per questo motivo assumere che i prodotti esportati facciano parte interamente della domanda finale potrebbe distorcere il risultato dell'analisi.

La MIOT endogena contabilizza, in valori monetari, beni e servizi prodotti internamente allo Stato; questa è composta, secondo la forma precedentemente descritta, dalla matrice delle transazioni $\mathbf{Z}_{\text{end}}$, dalla domanda finale $\mathbf{f}_{\text{end}}$ e dalla produzione totale $\mathbf{x}_{\text{end}}$ legate dal bilancio di produzione endogeno (3.24).

Analogamente, sulle importazioni viene eseguito un bilancio del tipo (3.25). I beni importati sono suddivisi in competitivi e non competitivi, quando sono prodotti anche dalla stessa economia nazionale.

$$\mathbf{x}_{\text{end}} = \mathbf{Z}_{\text{end}} \cdot \mathbf{i} + \mathbf{f}_{\text{end}} \quad (3.24)$$

$$\mathbf{x}_{\text{imp}} = \mathbf{Z}_{\text{imp}} \cdot \mathbf{i} + \mathbf{f}_{\text{imp}} \quad (3.25)$$

	1	...	n
1	Matrice nazionale delle transazioni Z_{end} (n x n)		
⋮			
n			

	1	...	q
1	Matrice endogena dei consumi finali f_{end} (n x q)		
⋮			
n			

	1
1	Vettore della produzione totale endogena x_{end} (n x 1)
⋮	
n	

	1	...	n
1	Matrice degli import ai consumi intermedi Z_{imp} (n x n)		
⋮			
n			

	1	...	q
1	Matrice degli import ai consumi finali f_{imp} (n x q)		
⋮			
n			

	1
1	Vettore degli import totali x_{imp} (n x 1)
⋮	
n	

Figura 3.6 MIOT nazionale suddivisa in produzione endogena e importazioni.

In letteratura emergono diversi metodi di trattamento dei flussi commerciali. E' necessario mettere a confronto almeno due di questi per quantificare la differenza in termini di risultati

finali e di affidabilità al fine di motivare la scelta fatta per il modello proposto e utilizzato nel Capitolo 4.

Sono stati teorizzati modelli cosiddetti *Single-Region* e *Multi-Regional* [42,49,63].

- I più semplici metodi *Single-Region* considerano le importazioni come se fossero beni prodotti internamente all'economia. L'ipotesi di fondo è che la loro produzione, ovunque avvenga, abbia un'efficienza pari a quella del settore economico dell'economia considerata. Inoltre i beni esportati sono intesi interamente come parte della domanda finale del paese.
- I modelli *Multi-Regional* sono più accurati, ma il loro sviluppo è più difficoltoso. Da un punto di vista teorico i flussi commerciali sono all'interno del dominio spaziale definito, così da mantenere al di fuori di esso soltanto i flussi di risorse primarie con l'ambiente. Ciò è possibile aggregando più economie nazionali, almeno tutte quelle coinvolte nei commerci.

Preliminarmente, ogni MIOT deve essere espressa in funzione della stessa valuta e lo standard di classificazione dell'economia correttamente armonizzato con gli altri. Mettendo insieme più MIOTs nazionali è possibile tener conto della provenienza e della destinazione di ogni bene scambiato e quindi sia delle efficienze di produzione dello Stato di provenienza che dell'utilizzo che ne viene fatto dallo Stato importatore. Non vengono fatte assunzioni sui beni scambiati, quindi il metodo può considerarsi esatto. Tuttavia aumenta la difficoltà di compilazione a causa delle fasi di accounting nazionali e di aggregazione.

I modelli multiregionali non necessariamente comprendono l'intera economia mondiale: vengono definiti *aperti* se analizzano una regione e i flussi commerciali al suo interno escludendo il resto del mondo, ad esempio una MIOT riferita alla sola Unione Europea [64]. In questo caso, rispetto all'esterno del dominio spaziale, si avrebbe un approccio analogo a un modello *Single-Region*.

Da un punto di vista di risorse primarie consumate, i risultati ottenuti dall'utilizzo di metodi diversi possono discostarsi tra loro [65]. Ciò è dovuto principalmente alle ipotesi assunte nei modelli *Single-Region*. Queste incidono maggiormente quando l'economia del paese analizzato si sostiene sull'importazione di combustibili fossili, fino a raggiungere il limite di risultati nulli in paesi totalmente dipendenti dalle importazioni di energia primaria.

3.3.3. Tavola Input - Output multiregionale

Si consideri una generica economia come l'aggregazione di Y economie nazionali, ognuna descrivibile dalla MIOT in Figura 3.6. La tavola multiregionale è sviluppata con flussi multidirezionali tra le economie.

Perciò le matrici delle transazioni intermedie e della domanda finale nell'eq. contengono nella diagonale principale le MIOT dirette di ogni nazione (3.26) e fuori dalla diagonale principale i flussi commerciali scambiati con le altre $(Y-1)$ nazioni (3.27).

$$\mathbf{Z}_{\text{end}} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{11} & - & - \\ - & \mathbf{Z}_{jj} & - \\ - & - & \mathbf{Z}_{YY} \end{bmatrix} \quad ; \quad \mathbf{f}_{\text{end}} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{11} & - & - \\ - & \mathbf{f}_{jj} & - \\ - & - & \mathbf{f}_{YY} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

$$\mathbf{Z}_{\text{trade}} = \begin{bmatrix} - & \mathbf{Z}_{1j} & \mathbf{Z}_{1Y} \\ \mathbf{Z}_{j1} & - & \mathbf{Z}_{jY} \\ \mathbf{Z}_{Y1} & \mathbf{Z}_{Yj} & - \end{bmatrix} \quad ; \quad \mathbf{f}_{\text{trade}} = \begin{bmatrix} - & \mathbf{f}_{1j} & \mathbf{f}_{1Y} \\ \mathbf{f}_{j1} & - & \mathbf{f}_{jY} \\ \mathbf{f}_{Y1} & \mathbf{f}_{Yj} & - \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Il singolo bilancio di produzione del paese i -esimo è dato dall'eq. (3.28) in cui vengono sommate la produzione endogena e quella destinata all'esportazione verso le nazioni j -esime.

$$\mathbf{x}_i = \mathbf{Z}_{ii}\mathbf{i}(n \times 1) + \mathbf{f}_{ii} + \sum_{j=1}^Y [\mathbf{Z}_{ij}\mathbf{i}(n \times 1) + \mathbf{f}_{ij}]_{j \neq i}$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_j \\ \mathbf{x}_Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{11} & \mathbf{Z}_{1j} & \mathbf{Z}_{1Y} \\ \mathbf{Z}_{j1} & \mathbf{Z}_{jj} & \mathbf{Z}_{jY} \\ \mathbf{Z}_{Y1} & \mathbf{Z}_{Yj} & \mathbf{Z}_{YY} \end{bmatrix} \mathbf{i}_z + \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{11} & \mathbf{f}_{1j} & \mathbf{f}_{1Y} \\ \mathbf{f}_{j1} & \mathbf{f}_{jj} & \mathbf{f}_{jY} \\ \mathbf{f}_{Y1} & \mathbf{f}_{Yj} & \mathbf{f}_{YY} \end{bmatrix} \mathbf{i}_f \quad (3.28)$$

La dimensione che assume la tavola multiregionale sarà n_{TOT} , dipendente dal livello di aggregazione degli n settori economici di ogni economia nazionale e dal numero di paesi considerati.

$$n_{TOT} = n \cdot Y \quad (3.29)$$

Applicando il modello di Leontief per valutare il consumo di risorse primarie o l'impatto ambientale totale, il trattamento degli scambi commerciali tramite flussi multidirezionali è un metodo esatto, ovvero in linea teorica vengono contabilizzati tutti i prodotti attraverso la propria efficienza di produzione. Ciò si traduce nella chiusura del bilancio (3.30) tra le risorse esogene utilizzate e la totalità dell'impatto ambientale della produzione mondiale, ad eccezione della eventuale presenza di un residuo dovuto all'approssimazione numerica a serie di potenze nella determinazione della *Matrice Inversa di Leontief* (3.11).

$$\mathbf{i}(1 \times k) \cdot \mathbf{R}(k \times n_{TOT}) \cdot \mathbf{i}(n_{TOT} \times 1) = \mathbf{R}_{TOT}$$

$$\mathbf{i}(1 \times k) \cdot [\mathbf{i}(1 \times n_{TOT}) \cdot \mathbf{E}(n_{TOT} \times k)]^T = \mathbf{E}_{TOT} = \mathbf{R}_{TOT} \quad (3.30)$$

La complessità del metodo multidirezionale risiede soprattutto nella corretta contabilizzazione degli scambi commerciali tra tutte le nazioni considerate. Trattando i flussi commerciali con modelli uni-direzionali o bi-direzionali si riduce la complessità del modello, che sarà composto da matrici sparse, ma si potrebbero trascurare alcuni scambi.

3.4. Analisi Input - Output ibrida

L'approccio ibrido è stato sviluppato al fine di compiere analisi LCA di beni e servizi, unendo i punti di forza dell'analisi di processo e della IOA [33]. La combinazione dei due approcci si deve a Bullard et al. (1978) che per primo ha unito l'analisi di processo con i risultati dell'analisi *Input - Output*, la quale si adatta bene alla fase più lontana di *upstream*.

La LCA condotta attraverso analisi ibrida (in inglese *Hybrid Input - Output Analysis*, H-IOA), sfrutta l'utilizzo delle tavole monetarie delle economie nazionali. In particolare l'adattamento delle tavole multiregionali all'analisi ibrida garantisce la completa inclusione del processo entro i confini del sistema [33].

In letteratura spesso l'aggettivo “*ibrido*” viene riferito all'unità di misura della IOA. Diversi autori [42,53,66] hanno aggiunto alle MIOTs, per lo più nazionali, informazioni sui volumi di flussi materiali scambiati. Questo approccio è particolarmente usato nelle analisi di impatto *E3* di politica energetica e nell'implementazione di modelli economici di *Computable General Equilibrium* (CGE) [66].

In questa ricerca l'aggettivo “*ibrido*” ha una duplice valenza e riguarda sia l'unità di misura della IOA che il metodo di LCA utilizzato, presentato nella Sezione 3.1 [5,33,34]. Costruire una tavola Input - Output ibrida (HIOT) a partire una MIOT nazionale consiste nell'esplicitare uno specifico sistema *S* dall'economia ed aggiungerlo a margine della MIOT stessa. Alla base della disaggregazione ci sono significativi passaggi e ipotesi.

Il bilancio produttivo globale (3.31) non cambia, ma variano i termini al suo interno (3.32).

$$\mathbf{x}_H = \mathbf{Z}_H \mathbf{i} + \mathbf{f}_H \quad (3.31)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{\mathbf{x}}_N \\ \mathbf{x}_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{Z}}_N & \mathbf{E}_{Ns} \\ \mathbf{E}_{Sn} & \mathbf{Z}_S \end{bmatrix} \cdot \mathbf{i}[(n+s) \times 1] + \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{f}}_N \\ \mathbf{f}_s \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

	1	...	n	1	...	s		1	...	q		1		1	...	k	1	...	k
1	$\mathbf{Z}_N$ corretta (n x n)			$\mathbf{E}_{Ns}$ (n x s)				$\mathbf{f}_N$ corretta (n x q)				$\mathbf{x}_N$ (n x 1)			$\mathbf{e}_N$ (n x k)			$\mathbf{E}_N$ (n x k)	
⋮																			
n																			
1	$\mathbf{E}_{Sn}$ (s x n)					$\mathbf{Z}_S$ (s x s)		$\mathbf{f}_s$ (s x q)				$\mathbf{x}_s$ (s x 1)			$\mathbf{e}_s$ (s x k)			$\mathbf{E}_s$ (s x k)	
s																			
1	$\mathbf{R}_N$ (k x n)																		
⋮																			
k																			

Figura 3.7 Tavola nazionale Input - Output ibrida (HIOT) .

Riferendosi ai bilanci (3.31), (3.32) e alla Figura 3.7 si introducono le seguenti definizioni:

- $\mathbf{N}$, indica l'economia nazionale composta da n settori;
- $\mathbf{S}$, indica il Sistema produttivo specifico. E' composto da s processi;
- $\mathbf{H}$, indica la struttura ibrida, formata dall'unione dell'economia nazionale e del sistema;
- $\mathbf{x}_H((n+s) \times 1)$ è il vettore ibrido di produzione totale;
- $\mathbf{Z}_H((n+s) \times (n+s))$ è la matrice ibrida delle transazioni intermedie;
- $\mathbf{f}_H((n+s) \times 1)$ è il vettore ibrido di domanda finale. Come chiarito tramite la (3.23) racchiude le destinazioni diverse di domanda finale contabilizzate dall'SNA.

Entrando nello specifico delle singole matrici, si faccia riferimento alla (3.32) e alla Figura 3.7:

- $\bar{\mathbf{Z}}_N, \bar{\mathbf{f}}_N, \bar{\mathbf{x}}_N$ rappresentano rispettivamente le matrici delle transazioni, della domanda finale e della produzione totale *corrette*;
- $\mathbf{Z}_S, \mathbf{f}_S, \mathbf{x}_S$ sono riferite al sistema $\mathbf{S}$;
- $\mathbf{E}_{NS}$ è la matrice di *Upstream Cutoff* che indica i prodotti che dalla Nazione vanno al Sistema;
- $\mathbf{E}_{SN}$ è la matrice di *Downstream Cutoff* che rappresenta i flussi dal Sistema verso la Nazione;
- $\mathbf{R}_S$ registra le risorse esogene che fluiscono dall'ambiente al sistema $\mathbf{S}$.

Tutti i flussi che legano il sistema $\mathbf{S}$ alla nazione sono contenuti nelle due matrici di *Cutoff*. In particolare la $\mathbf{E}_{NS}$ contabilizza tutti i beni e i servizi di cui $\mathbf{S}$ necessita per produrre la propria domanda finale $\mathbf{f}_S$.

Per quanto riguarda le risorse esogene $\mathbf{R}_S$ bisogna prestare particolare attenzione a non incorrere in un *double accounting*. Infatti l'approccio ibrido si basa sulla disaggregazione di uno specifico processo e non sulla variazione del dominio spaziale dell'analisi: in questo modo il sistema $\mathbf{S}$ si trova comunque all'interno del sistema paese analizzato dalla MIOT originaria e perciò il saldo totale delle risorse in ingresso nell'economia nazionale non può variare.

Supponendo di avere un sistema $\mathbf{S}(s \times s)$ disaggregato dai settori $\bar{n}$, bisogna operare una correzione sulla MIOT originale; ciò consiste nell'estrazione delle matrici aggiuntive dal rispettivo settore economico secondo la (3.33), al fine di mantenere equilibrati i bilanci di produzione (3.31) e (3.5).

$$\begin{aligned}\bar{\mathbf{Z}}_{N,(1:n;\bar{n})} &= \mathbf{Z}_{N,(1:n;\bar{n})} - \mathbf{E}_{NS} (n \times s) \\ \bar{\mathbf{Z}}_{N,(\bar{n};1:n)} &= \mathbf{Z}_{N,(\bar{n};1:n)} - \mathbf{E}_{SN} (s \times n)\end{aligned}\tag{3.33}$$

L'analisi ibrida non richiede di mantenere le unità di misura omogenee tra la nazione e il sistema. Tuttavia negli elementi in cui $\mathbf{S}$ è legato a $\mathbf{N}$ i flussi fisici debbono essere

adeguatamente convertiti in unità monetarie. Ciò avviene sia nelle matrici di *Cutoff* che nella correzione della domanda finale (3.34) dove $\hat{\mathbf{p}}_S$ indica il prezzo attraverso il quale viene valorizzata la domanda finale del sistema, se espressa in unità fisiche.

$$\bar{\mathbf{f}}_{N,\bar{n}} = \mathbf{f}_{N,\bar{n}}(s \times 1) - \hat{\mathbf{p}}_S(s \times s) \cdot \mathbf{f}_S(s \times 1) \quad (3.34)$$

A sua volta la produzione totale nazionale $\bar{\mathbf{x}}_N$ deve essere nuovamente ricavata secondo la (3.35). Se il sistema S opera all'interno della nazione la produzione intermedia non varia, mentre la domanda finale può cambiare solo se S produce beni o servizi per i consumi finali e quindi $\bar{\mathbf{f}}_n \neq \mathbf{f}_n$.

$$\bar{\mathbf{x}}_N = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{Z}}_N & \mathbf{E}_{NS} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{i}((n+s) \times 1) + \bar{\mathbf{f}}_N \quad (3.35)$$

Anche il vettore di risorse esogene va corretto attraverso la (3.36) al fine di applicare correttamente il modello di Leontief e valutare l'impatto ambientale globale dei prodotti.

$$\bar{\mathbf{R}}_N = \mathbf{R}_{N,(1:m,\bar{n})} - \mathbf{R}_S(m \times s) \quad (3.36)$$

4.

Analisi di ciclo di vita degli interventi di efficientamento energetico

L'obiettivo di questo capitolo è di adattare ed applicare il modello LCA delineato in forma generale e teorica nel precedente capitolo allo studio degli interventi di efficientamento energetico.

Si intende seguire l'approccio dettato dalle norme UNI EN ISO 14040 - 14044 che contengono i principi e le linee guida per una corretta *Analisi di ciclo di vita* [33,37].

Preliminarmente si definisce lo scopo e il campo di applicazione dell'LCA, quindi si adatta il modello teorico al caso studio. Viene condotta un'analisi dell'inventario (LCI) per caratterizzare l'unità funzionale prescelta e, infine, si esegue l'analisi degli impatti (LCIA) e l'interpretazione dei risultati ottenuti.

4.1. Obiettivo e ipotesi generali

Lo scopo della LCA, attraverso il modello computazionale *Input - Output*, è di provvedere a una più completa analisi dell'impatto ambientale relativo a interventi di efficientamento energetico, in termini di consumo di risorse primarie, emissioni di gas serra e acidificanti e di manodopera impiegata. Quest'ultimo, pur essendo tipicamente estraneo ad analisi di ciclo di vita di beni e servizi [33,40], viene inserito nella valutazione come un indicatore addizionale per ottenere una maggiore sistematicità d'analisi.

Gli obiettivi specifici del presente studio sono:

- La valutazione dell'impatto ambientale globale della fase di realizzazione del progetto;
- La quantificazione dell'impatto ambientale globale netto al termine dell'intera vita utile della tecnologia installata, dipendente sia dalla fase di realizzazione che dalla fase operativa della stessa.

I risultati sono raggiunti sotto ipotesi opportune per mantenere la coerenza con il metodo di valutazione attualmente in uso e per poter eseguire delle comparazioni tra i risultati ottenuti e quelli previsti secondo il meccanismo italiano.

Visto il contesto normativo attuale, l'interlocutore ideale di questo strumento è il policy maker, che può ritenersi interessato a valutare secondo molteplici impatti ambientali il progetto di efficientamento presentato da un soggetto privato. Inoltre può essere interessato a quantificare la discrepanza tra il risparmio di energia primaria certificato ed il reale risparmio di risorse primarie del paese calcolato in ottica di ciclo di vita. Nello specifico ci si rivolge a GSE, ENEA e RSE a cui, per legge, sono affidati i ruoli decisionali e valutativi nel meccanismo dei *Certificati Bianchi*.

4.1.1. Scelta dell'unità funzionale

L'analisi LCA è applicato ad alcuni interventi di efficientamento energetico catalogati da schede tecniche standard dal legislatore italiano. Per ognuno, l'unità funzionale è la dimensione dell'intervento tale da garantire un risparmio energetico di 1 *ktep* stabilito dalla normativa. Tuttavia, la struttura del modello è elaborata in modo da poter essere adattata al numero più elevato possibile di casistiche.

In questa applicazione l'unità funzionale è collocata in Italia nell'anno 2010.

Ogni unità funzionale è idealmente schematizzabile come la *black box* di Figura 4.1 in cui si ha un flusso economico in ingresso ed un output energetico negativo, poiché si tratta di un risparmio energetico.

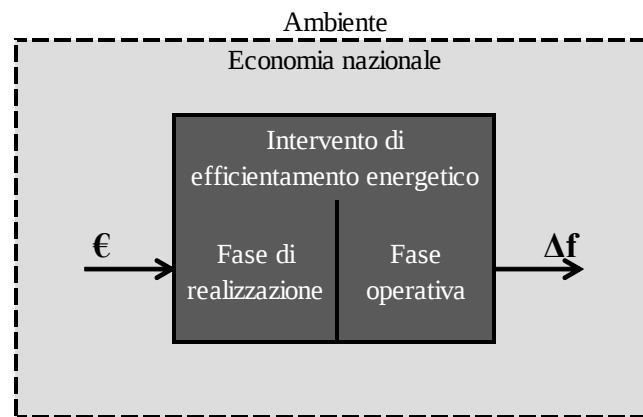


Figura 4.1 Unità funzionale dell'LCA.

Le due principali fasi della vita di un tale progetto sono la fase di realizzazione e la fase operativa. Nella valutazione dell'impatto ambientale della fase di realizzazione viene considerato il cosiddetto dominio temporale "*from cradle to gate*" e sulla base di questo viene definito il flusso monetario in ingresso.

Nel calcolo dell'impatto ambientale netto al termine della vita utile del progetto, invece, viene considerata anche la fase operativa, durante la quale la tecnologia installata genera un risparmio energetico annuale. Ogni intervento di efficientamento energetico è caratterizzato da [21]:

- Vita Tecnica (T) che, generalmente, supera i 10 anni durante i quali la normativa presuppone che la tecnologia installata garantisca risparmi energetici;
- Vita Utile (U) rappresentante gli anni durante i quali al progetto vengono certificati i risparmi ottenuti: U oscilla tra 5 e 8 anni a seconda dell'intervento.

Riportando la definizione fornita dall'AEEGSI, un progetto di efficientamento energetico è "*una qualsiasi attività o insieme di attività che produce risparmi di energia primaria certi e*

quantificabili attraverso [...] uno o più interventi valutabili con il medesimo metodo di valutazione ...” [27].

Per rendere possibile la comparazione tra gli interventi analizzati ed il confronto con i risparmi calcolati ufficialmente, ogni unità funzionale ha dimensione di 1 *ktep* di risparmio lordo (RL) generato, in accordo con la normativa italiana. Questo è quantificato in energia primaria valutato dalla normativa a partire dal risparmio conseguito agli usi finali di vettori energetici quali il gas naturale o l'elettricità.

Partendo da un valore predeterminato di RL, invertendo l'eq. (2.3), l'intervento comporta la realizzazione di un numero di UFR tale da garantire il risparmio obiettivo. Si ricorda che la normativa italiana consente l'accumulazione di più interventi afferenti alla stessa Scheda Tecnica e la presentazione di questi come un unico progetto [21]; pertanto, in linea teorica, i casi studio analizzati sono realizzabili nella pratica.

Secondo il modello *Input - Output* utilizzato, la relazione tra impatto ambientale e unità funzionale è proporzionale alla dimensione dell'unità funzionale stessa. E' stata scelta la dimensione di riferimento di 1 *ktep*, al posto di una singola UFR, per i seguenti motivi:

- Semplicità di comparazione dei risultati ottenuti da diversi interventi di efficientamento energetico;
- Immediatezza di confronto degli impatti ambientali e dimensione significativa degli stessi;
- Partire dal valore quantificato dalla normativa appare la scelta più affidabile. Due alternative possibili sarebbero di andare a misurare sul campo il risparmio generato all'utente finale da ogni singolo intervento o di stimarlo sotto opportune ipotesi: il primo caso non sembra fattibile in termini di tempo, mentre il secondo ricade in una soluzione analoga al metodo di calcolo del GSE, ma differente per ipotesi di fondo (ad esempio zona climatica, PCI, rendimenti di riferimento,...) e, conseguentemente, non farebbe emergere il cambio di paradigma, bensì l'incidenza delle ipotesi adottate dal GSE nella redazione delle Schede Tecniche.

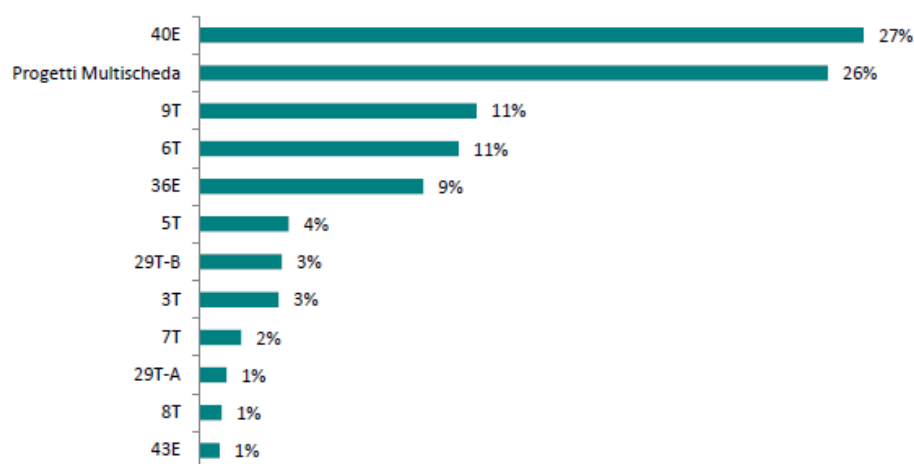


Figura 4.2 Suddivisione dei TEE rilasciati nel 2015 da progetti standard [28].

I progetti standard sono stati scelti sulla base dei dati reperibili e con la volontà di voler ricoprire il campo di casistiche più ampio possibile.

Basandosi sui dati GSE al 2015 di Figura 4.2, sono stati scelti 15 interventi campione, che complessivamente costituiscono circa il 70% del totale dei risparmi certificati attraverso ST-S nel 2015. Bisogna però notare che la restante parte dei titoli emessi è stata realizzata attraverso “progetti multischeda”, ovvero risparmi energetici che, soprattutto in ambito domestico, vengono valutati attraverso ST-S differenti e cumulati al fine di raggiungere la dimensione minima (ad esempio, uno stesso proponente interviene sull’impianto termico domestico e, contestualmente, installa dei collettori solari).

Per gli interventi valutabili a consuntivo non è stato possibile effettuare l’analisi per mancanza di dati sufficientemente affidabili. Questo tipo di progetti non sono facilmente valutabili a priori perché influenzati da numerose variabili.

- La procedura di valutazione comporta un’incertezza sull’accettazione del progetto da parte del GSE;
- Una seconda incertezza risiede sulla misurazione del risparmio, che soltanto per i primi 12 mesi di vita deve superare la dimensione minima (60 tep). In questo modo il proponente può essere portato a “forzare” il dispositivo a lavorare inizialmente con una resa superiore alle condizioni di funzionamento per poi trascurare questo aspetto negli anni a seguire;
- La durata della vita tecnica T è stabilita dal proponente e successivamente accettata dal GSE.

Per questi motivi ci si è limitati ad applicare il modello ad interventi valutati da Schede Tecniche Standard. Ciò non toglie che l’approccio presentato possa essere applicato a ogni tipo di progetto conosciuto con un certo grado di affidabilità o dal proponente stesso del progetto.

Nel seguito vengono illustrati gli interventi scelti per il caso applicativo e le condizioni di contorno imposte a priori. Come visto nella Sezione 2.4, i risparmi energetici prestabiliti nelle ST-S sono funzione di alcune variabili che devono, quindi, essere opportunamente scelte e motivate.

Una condizione comune a tutti gli interventi è l’ubicazione geografica: è stato supposto che gli interventi siano realizzati tutti in Lombardia, in particolare si fa riferimento ad una zona come la provincia di Varese. I motivi di questa scelta sono molteplici.

- Uniformare la zona climatica - o intervallo di gradi giorno - in ogni applicazione. La fascia climatica (zona E) è un parametro discriminante che ricorre spesso nelle ST-S per la determinazione delle dispersioni termiche, dell’irraggiamento medio e delle ore di funzionamento dei collettori solari;
- La regione Lombardia, come poche altre regioni italiane, ha creato da qualche anno il Catasto ENergetico degli Edifici Regionale (CENED) [67], una piattaforma dove sono depositati gli attestati di prestazione energetica e sono registrate le caratteristiche degli edifici dei settori residenziale e terziario. Pur non essendo ancora

completamente esaustivo, è importante per stabilire le caratteristiche medie degli edifici e scegliere il tipo di intervento di efficientamento realizzabile;

- Avere a disposizione utenze più variegata possibile, in modo da scegliere un campione di interventi che tocchi il settore domestico così come quello industriale o, ancora, il terziario;
- Avere facilmente a disposizione materie prime per realizzare gli interventi e infrastrutture adeguate al loro trasporto. Se si scegliesse un ambito montano o insulare i costi di investimento sarebbero fortemente influenzati dall'approvvigionamento delle materie prime.

Il campione di interventi selezionato per il caso studio è formato dai 15 progetti raccolti in Tabella 4.1, in misura tale da assicurare un risparmio di energia primaria ai consumi finali di 1 *ktep*.

Scheda Tecnica	UFR	RSL	energia risparmiata	T	U	τ
[tep/UFR/anno]						
ST 2T	1 abitazione	0,073	elettricità	15	5	2,65
ST 3T	1 abitazione	0,092	gas naturale	15	5	2,65
ST 5T	1 mq	0,015	gas naturale	30	8	2,91
ST 6T a	1 mq	0,0039	gas naturale	30	8	2,91
ST 6T b	1 mq	0,0039	gas naturale	30	8	2,91
ST 7T	1 impianto da 20kW _p	4,8	elettricità	20	5	3,36
ST 8T a	1 mq collettori	0,104	elettricità	15	5	2,65
ST 8T b	1 mq collettori	0,061	gas naturale	15	5	2,65
ST 9T	1 kW _{nom}	0,08825	elettricità	15	5	2,65
ST 17T	1 W _{nom}	0,0001543	elettricità	15	5	2,65
ST 27T	1 abitazione	0,083	30% elettr, 70% gas	15	5	2,65
ST 36E	1 kVA	0,000089	elettricità	10	5	1,95
ST 37E	1 abitazione	0,33	gas naturale	15	5	2,65
ST 39E	1 mq telo	0,00292	gas naturale	30	8	2,91
ST 40E	1 mq suolo	0,059	gas naturale	15	5	2,65

Tabella 4.1 Sintesi degli interventi analizzati.

ST 2T - Sostituzione dello scaldacqua elettrico con uno scaldacqua a metano

Consente un risparmio di energia elettrica nella produzione di acqua calda sanitaria (ACS). Il risparmio generato non è dipendente da nessuna variabile al contorno.

ST 3T - Installazione di caldaia unifamiliare a gas naturale a 4 stelle di efficienza

Consente un risparmio di gas naturale attraverso l'incremento dell'efficienza di combustione rispetto alla situazione *ex ante* o alla *baseline* di mercato. Come accade in buona parte delle

abitazioni, è stato ipotizzato l'utilizzo del nuovo dispositivo per "Riscaldamento + ACS" da cui dipende il parametro RSL .

ST 5T - Sostituzione di vetri semplici con doppi vetri

Consente un risparmio di gas naturale sul riscaldamento e raffrescamento degli ambienti, sia limitando le dispersioni termiche invernali che riducendo l'apporto solare estivo. I vetri devono soddisfare determinati requisiti minimi di isolamento.

ST 6T - Isolamento delle pareti e delle coperture

Può essere effettuato con diverse modalità, mantenendo adeguate caratteristiche minime. Sono state prese in considerazione due modalità diverse di intervento, a pari risparmio obiettivo: isolamento a cappotto e con lana di roccia. La differenza tra i due risiede nel costo dell'intervento e se ne vuole valutare il diverso beneficio del paese in ottica LCA. Il vantaggio che ne deriva, in entrambi i casi, è un risparmio di gas naturale per la climatizzazione invernale ed estiva. Per la scelta del risparmio di riferimento viene considerato un valore medio di trasmittanza termica degli edifici $\bar{K} = 1,28 [W/m^2 / K]$, caratteristico della provincia di Varese.

ST 7T - Impianto fotovoltaico di potenza elettrica inferiore a 20kW_p

Si considerano gli impianti di piccola taglia, tipicamente installati a tetto. Questa informazione è importante per la determinazione del costo di investimento [68]. Si è supposto che ogni singolo impianto abbia potenza nominale di 20kW_p per minimizzare i costi specifici e che le ore di funzionamento siano quelle relative alla fascia 1. Questo intervento consente di ridurre i consumi di energia elettrica.

ST 8T - Installazione di collettori solari per la produzione di Acqua Calda Sanitaria

Per ipotesi non si sono considerati i collettori sottovuoto, poco diffusi nelle condizioni climatiche italiane. Sono state esaminate due casistiche: l'installazione su un preesistente impianto elettrico e a gas naturale. La differenza tra le due, come per la ST 6T, sta nel costo di investimento, ma si ripercuote anche sui risparmi energetici generati. Gli altri parametri di valutazione sono comuni ad entrambi. Il risparmio energetico sarà di elettricità o gas naturale a seconda dell'impianto preesistente.

ST 9T - Installazione di inverter in motori elettrici operanti su sistemi di pompaggio con potenza inferiore a 22kW

E' un intervento in ambito industriale, bisogna supporre valori ragionevoli di turni di lavoro dell'impianto (2 turni) e il rapporto tra prevalenza statica e nominale (40%) dai quali deriva il risparmio generato di elettricità.

ST 17T - Installazione di regolatori di flusso luminoso su impianti di illuminazione esterna

E' uno strumento di *demand side management* che permette di modulare l'intensità luminosa in base alla luce ambientale e all'orario di funzionamento, risparmiando energia elettrica nei momenti in cui non serve la massima potenza. Supponendo di installare il dispositivo in siti che garantiscono un discreto sfruttamento delle sue potenzialità si considerano valori di ore equivalenti e P_{rid}/P medio-alti.

ST 27T - Installazione di Pompa di Calore (PdC) elettrica in impianti nuovi o esistenti

La scheda tecnica stabilisce che il risparmio energetico generato è ipotizzato come un mix di combustibili (30% elettricità e 70% gas naturale). Si suppone una PdC di buona qualità (COP=3), da cui derivano gli alti costi di investimento registrati e i risparmi specifici generati.

ST 36E - Installazione di gruppi di continuità statici (UPS) ad alta efficienza

Intervento applicabile sia al settore industriale che al civile (ospedali, centri commerciali, grandi uffici,...), in questo caso viene ipotizzato su ospedali. Vengono anche supposti un miglioramento di efficienza $\Delta\eta = 6\%$ e una taglia media di 10 kVA, che ne giustificano l'intervento. Consente di risparmiare elettricità.

ST 37E - Installazione di impianto di riscaldamento unifamiliare alimentato a biomassa legnosa

L'intervento è valutato attraverso la ST-S analizzata dettagliatamente nella Sezione 2.4. Si suppone per l'abitazione di riferimento un rapporto $S/V < 0,5$, l'utilizzo per finalità di solo riscaldamento e l'integrazione con un impianto alimentato a gas naturale. Il valore abbastanza elevato di RSL è favorito dalla zona climatica scelta.

ST 39E - Installazione di schermi termici per l'isolamento termico del sistema serra

Anche questo intervento è stato approfondito nella Sezione 2.4 e coinvolge il settore serricolo. Consente un risparmio di combustibile per il riscaldamento dell'ambiente: questo può essere considerato gas naturale, in particolare quando non si interviene su serre di grandi dimensioni, tipiche di altre zone d'Italia.

ST 40E - Installazione di impianto di riscaldamento alimentato a biomassa legnosa nel settore della serra coltura

ST valida sia per interventi di ammodernamento che per nuove installazioni. Da report di settore emerge che attualmente la copertura più diffusa delle serre è in film plastico; è stata assunta pertanto questa condizione che, insieme ad un valore intermedio tra area disperdente e suolo coltivato, garantisce un risparmio specifico relativamente elevato.

4.1.2. Ipotesi generali

Per impostare il modello computazionale *Input - Output* e condurre l'analisi di ciclo di vita sulle unità funzionali selezionate, è necessario chiarire alcune ipotesi semplificative sul metodo e sui dati.

Ipotesi sul metodo

- Il risparmio conseguito tramite l'intervento di efficientamento energetico è energia primaria che il sistema paese non deve più fornire ai consumatori. Rappresenta quindi uno *shock* di domanda finale che viene analizzato in ottica LCA, in accordo con quanto illustrato nella Sezione 3.2.4. Si assume che lo *shock* analizzato sia sempre trascurabile rispetto alla dimensione dell'economia nazionale e che, pertanto, le efficienze di produzione dei settori economici non vengano variate;

- L'Italia è fortemente dipendente dalle importazioni di gas naturale e petrolio, in accordo con quanto detto nel capitolo introduttivo. Per questo motivo è stato preferito un modello multiregionale aperto con flussi commerciali multidirezionali che, a fronte di una maggiore complessità computazionale, garantisce risultati più accurati del modello *Single-Region*;
- L'intervento di efficientamento energetico è compiuto interamente in Italia e le risorse necessarie alla sua realizzazione provengono da attività economiche italiane. Senza questa assunzione sarebbe impossibile conoscere a priori di quali beni e servizi d'importazione il sistema necessita e da dove questi provengano;
- Si considera l'intervento posizionato interamente nel primo anno della Vita Tecnica T , stabilita dalla normativa. In questo anno il paese beneficia comunque del risparmio energetico generato: ciò non è sempre vero, specialmente nel caso di grandi progetti industriali, tuttavia nelle applicazioni analizzate si trattano interventi di dimensioni ridotte, spesso domestici, e per questo si ritiene che possa essere un'approssimazione accettabile;
- Nell'arco della vita operativa dell'intervento la struttura economica mondiale non subisce variazioni. Per questo motivo il risparmio ambientale annuale in ottica LCA si mantiene pari a quello sperimentato nell'anno di analisi, salvo l'applicazione del tasso di decadimento δ , presente nella eq. (2.4) e riferito al dispositivo. I motivi principali di questa forte ipotesi sono la difficoltà di compilazione e i tempi di aggiornamento del database multiregionale utilizzato.
Inoltre si assume l'assenza di *Rebound Effect*², o *effetto di rimbalzo*. Questa è una conseguenza di medio-lungo periodo e si pone in contrasto con l'*analisi Input - Output*, che rappresenta una fotografia dell'economia in un preciso istante di tempo. Per questo motivo il modello proposto può soffrire l'analisi sul lungo periodo, tuttavia si deve considerare che le dimensioni dei sistemi analizzati sono limitate per poter modificare da sole il prezzo del prodotto del settore energetico italiano [69,70];
- L'impatto ambientale evitato dall'intervento è valutato come uno *shock* di consumo finale da parte del consumatore. Tale grandezza viene valorizzata al prezzo dell'energia relativo all'anno di analisi. Quest'ultimo si assume costante negli anni, supportato da un margine di errore;
- Si è preferito valutare nello specifico i gas inquinanti ritenuti significativi senza ricorrere a normalizzazione secondo l'approccio proposto dall'IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) che quantifica le emissioni di diversi gas inquinanti in termini di effetto serra attraverso il *Global Warming Potential* su un orizzonte temporale di decine di anni [53,54,71].

² In economia energetica il *Rebound Effect* è l'attenuazione del risparmio energetico ottenibile sul medio-lungo termine a causa dell'abbassamento del prezzo dell'energia, reso possibile dall'introduzione di una tecnologia più efficiente. In letteratura si distinguono tre diversi effetti [16,69,70]: *diretto*, *indiretto* e *macroeconomico*. Limitare l'*effetto di rimbalzo* è il principale motivo per cui nelle politiche energetiche ad una manovra di promozione dell'efficienza si accompagna una tassa sui consumi di combustibile [84].

Ipotesi sui dati.

- Il flusso economico in input all'unità funzionale è composto dal solo investimento economico iniziale. Considerando, infatti, gli attori ed i rispettivi ruoli in ambito di efficienza energetica, il soggetto che “produce” l'intervento solitamente si incarica dell'investimento iniziale (o *capital expenditure*, CAPEX) per poi lasciare in mano al cliente partecipante il dispositivo installato e le eventuali spese di gestione e manutenzione (o *operating expense*, OPEX) [27]. Inoltre, per gli interventi esaminati - ad esempio il rifacimento dell'involucro edilizio o l'installazione di schermi termici nelle serre - gli OPEX risultano di un ordine di grandezza inferiore rispetto ai CAPEX [25];
- Il campione di interventi scelto è caratterizzato da condizioni al contorno più omogenee possibili poiché queste influiscono sulla determinazione di *RL*. In particolare si è supposto di realizzare gli interventi in una ben precisa zona geografica, opportunamente motivata nell'analisi di inventario;
- L'investimento economico è stato ricavato per singola unità fisica di riferimento e successivamente, sfruttando la linearità garantita dalle Schede Tecniche nell'equazione (2.2), l'investimento è stato riferito all'unità funzionale ed espresso in USD corrente al 2010;
- Si assume la vita tecnica *T* di ogni intervento sulla base di quanto stabilito dal GSE, così come il tasso di decadimento di prestazione energetica δ ;
- Quando non disponibili i dati aggiornati al 2010, si è scelto di utilizzare dati relativi al 2009. La collezione e l'aggregazione dei dati 2010 dai singoli istituti statistici nazionali sarebbe teoricamente possibile, ma è altamente probabile cadere in errore a causa delle non omogenee ipotesi di *accounting* riguardo la definizione dei confini del singolo sistema paese e la disaggregazione settoriale: per la prima non c'è accordo unanime tra l'*accounting* secondo il principio di residenza o di territorialità (con confusione, ad esempio, sul settore dei trasporti e sulle multinazionali), mentre per la seconda le attività economiche di ogni stato possono seguire classificazioni differenti o addirittura versioni diverse della medesima classificazione [47,59,60,72].

4.2. Modello di calcolo

Nella presente sezione vengono illustrati i dati di base ed il modello teorico con il quale viene operativamente condotta l'analisi di ciclo di vita nel caso studio. Preliminarmente, vengono illustrate le assunzioni fondamentali relative ad entrambi.

4.2.1. Dataset e categorie di impatto

Nell'analisi del ciclo di vita, oltre alla descrizione metodologica del modello di valutazione del sistema *S*, è necessaria la caratterizzazione del *dataset* utilizzato. Frequentemente le

banche dati utilizzate nell'inventario della LCA sono pubbliche, trasparenti e compilate con dati affidabili [33].

Nella Sezione 3.3.2 si è chiarito come le tavole multiregionali con flussi import/export multidirezionali siano preferibili alle MIOTs nazionali in termini di accuratezza dei risultati. La tavola rappresentante l'economia mondiale (anche *World Input - Output Table*, WIOT) è stata costruita dal *World Input-Output Database (WIOD) project*, finanziato dall'Unione Europea e sviluppato nel triennio 2009-2012 in collaborazione tra numerosi istituti universitari, economici e politici europei. Il database unisce informazioni dettagliate riguardo i flussi commerciali internazionali ai sistemi produttivi di 41 paesi considerati: 27 paesi dell'Unione Europea, 13 maggiori paesi extraeuropei e “*Resto del mondo*” che ingloba tutte le nazioni che non vengono considerate singolarmente [73].

Si intuisce come la forza di questo strumento risieda nel dettaglio di informazioni collezionate, ma la loro raccolta costituisce una grande difficoltà nel mantenerlo aggiornato nel tempo. L'anno di riferimento per le analisi effettuate è il 2010 a causa della tavola WIOT pubblicamente disponibile [74]. Attualmente non sono disponibili online database più aggiornati.

La tavola WIOT segue la classificazione delle attività economiche ISIC Rev.3 [75] composta da 35 settori per ogni paese considerato.

Al fine di espandere le finalità del *dataset* a più ampi temi di ricerca rispetto all'economia, sono stati sviluppati i cosiddetti *satellite accounts* ambientali e socio-economici, armonizzati con la struttura della WIOT.

La forza del metodo di accounting ambientale³ proposto nel WIOD, sfruttato in questo lavoro, risiede nel non considerare soltanto la correlazione tra un combustibile e le emissioni prodotte dalla combustione (*Energy-related air emissions*), ma anche quelle non direttamente legate alla combustione (*non-energy-related air emissions*) secondo l'eq. (4.1) in cui X è l'inquinante valutato.

$$EM(X) = EM_{energy}(X) + EM_{non-energy}(X) \quad (4.1)$$

EM_{energy} considerano il mix di combustibili fossili tipicamente utilizzati da ogni settore dei 41 paesi della WIOT, mentre $EM_{non-energy}$ collezionano emissioni provenienti da:

- reti di distribuzione, stoccaggi e altre fasi di movimentazione nella filiera;
- processi industriali (industria chimica, metallifera, estrattiva, ...);
- particolari prodotti utilizzati dalle industrie (spray, solventi, pitture, ...);
- prodotti agricoli, concimi naturali, incendi;
- rifiuti e altre fonti legate alle attività dell'uomo.

³ A differenza delle risorse primarie, le emissioni atmosferiche sono prodotte sia dai settori produttivi che dai consumi finali (attribuiti alla voce “spesa per consumi finali delle famiglie”). Non si è considerato quest'ultimo contributo in quanto il *dataset* WIOD a disposizione non consente l'accurata disaggregazione delle emissioni nazionali complessive dei consumi finali nelle 35 attività economiche del paese e l'accurata attribuzione delle stesse a tutti i beni e i servizi commercializzati.

Gli *environmental accounts* del WIOD comprendono anche gli usi energetici dell'economia nazionale e contabilizzano l'utilizzo di combustibili fossili secondo la ISIC Rev.3 per ogni paese, a partire dai bilanci energetici territoriali pubblicati annualmente dalla IEA. Questi dati sono più facilmente disponibili rispetto alle emissioni di inquinanti perché le metodologie di raccolta sono ormai consolidate da anni, ma l'aggregazione coerente con la WIOT può essere fonte di errore [76].

I *socio-economic accounts* (SEAs) contengono informazioni sui prezzi dei prodotti, sul valore aggiunto, sul compenso dei lavoratori, la numerosità degli stessi e le ore di lavoro. Alcuni indicatori sono divisi per livello di competenza (*low, medium, high skilled*), mentre altri sono registrati sottoforma di numeri assoluti [77].

4.2.2. Analisi Input - Output ibrida

I passaggi algebrici illustrati nella Sezione 3.4 permettono di adattare una MIOT nazionale all'analisi ibrida, tuttavia in questa ricerca si intende utilizzare una tavola multiregionale, con particolare riferimento al database WIOD [73,78]. Quest'ultimo, descritto dai bilanci (3.28) per il generico modello multiregionale, può essere rappresentato dal bilancio di produzione (4.2). La WIOT comprende Y nazioni, ognuna composta da n settori, in accordo con la ISIC Rev.3, ed ha dimensione totale n_{WIOT} (4.3).

$$\mathbf{x}_{WIOT} (n_{WIOT} \times 1) = \mathbf{Z}_{WIOT} \mathbf{i}_z + \mathbf{f}_{WIOT} \mathbf{i}_f$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_j \\ \mathbf{x}_Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{11} & \mathbf{Z}_{1j} & \mathbf{Z}_{1Y} \\ \mathbf{Z}_{j1} & \mathbf{Z}_{jj} & \mathbf{Z}_{jY} \\ \mathbf{Z}_{Y1} & \mathbf{Z}_{Yj} & \mathbf{Z}_{YY} \end{bmatrix} \mathbf{i}_z + \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{11} & \mathbf{f}_{1j} & \mathbf{f}_{1Y} \\ \mathbf{f}_{j1} & \mathbf{f}_{jj} & \mathbf{f}_{jY} \\ \mathbf{f}_{Y1} & \mathbf{f}_{Yj} & \mathbf{f}_{YY} \end{bmatrix} \mathbf{i}_f \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} Y &= 41 \\ n &= 35 \\ n_{WIOT} &= Y \cdot n = 1435 \end{aligned} \quad (4.3)$$

Partendo dalla tavola dell'economia mondiale, nel seguito vengono dettagliate le procedure di calcolo che consentono di determinare le grandezze di interesse, in accordo con il modello teorico illustrato nel Capitolo 3.

- *Calcolo dell'impatto ambientale associato alla fase di realizzazione dell'intervento:* partendo dalla situazione *ex ante*, precedente a ogni intervento, il sistema multiregionale viene reso ibrido. In questo passaggio viene modificata l'aggregazione settoriale ma non viene variata la domanda finale. Analiticamente, il sistema ibrido ha dimensioni aumentate ($n_{WIOT} + s$) e ciò introduce un grado di libertà eccessivo nella determinazione dell'impatto ambientale secondo il modello di Leontief. Se contemporaneamente venisse reso ibrido e introdotto lo *shock*, il calcolo della nuova $\mathbf{L}$ non sarebbe corretto: il sistema paese riassisterebbe la propria struttura produttiva in modo da chiudere il bilancio (3.17), non consentendo di indagare l'effetto dello *shock* di domanda.

Inoltre è importante che anche $\mathbf{B}$, come $\mathbf{L}$, non subisca variazioni: significa che le efficienze di trasformazione dell'energia primaria da parte delle attività produttive non mutano a causa della disaggregazione di un sistema da un settore e che i costi specifici di produzione rimangano invariati;

- *Calcolo dell'impatto ambientale totale evitato durante la fase operativa dell'intervento*: viene analizzato l'effetto dovuto allo shock di domanda finale, in accordo con la metodologia descritta nella Sezione 3.2.4. Al fine di non perturbare l'analisi con la disaggregazione del sistema $\mathbf{S}$ dall'economia mondiale, non viene utilizzato il modello ibrido seppur, viste le dimensioni del sistema $\mathbf{S}$, l'errore introdotto sarebbe trascurabile;
- *Calcolo del bilancio dell'impatto ambientale totale netto a fine vita utile dell'intervento*: i due termini precedentemente calcolati vengono uniti all'interno di un bilancio ambientale, condotto in linea con le ipotesi della Sezione 4.1.2.

Calcolo dell'impatto ambientale totale associato alla fase di realizzazione dell'intervento di efficientamento energetico

Si chiamino $\bar{y}_1^{35}$ le righe relative alla nazione Italia e $\bar{y}_{\bar{n}}$ la riga relativa ad uno specifico settore $\bar{n}$ dell'economia italiana. Le matrici ibride mondiali di *Upstream* e *Downstream Cutoff* hanno elementi non nulli in corrispondenza dei settori economici italiani e sono definite rispettivamente dalle eq. (4.4) e (4.5), mentre il bilancio di produzione ibrido mondiale dalla (4.6).

$$\mathbf{E}_{\text{NS}} = \begin{bmatrix} - \\ \mathbf{E}_{\text{NS}, \bar{y}_1^{35}} \\ - \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$$\mathbf{E}_{\text{SN}} = \begin{bmatrix} - & \mathbf{E}_{\text{SN}, \bar{y}_1^{35}} & - \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}_{\text{WIOT}} \\ \mathbf{x}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{\text{WIOT}} & \mathbf{E}_{\text{NS}} \\ \mathbf{E}_{\text{SN}} & \mathbf{Z}_s \end{bmatrix} \mathbf{i}_{\text{H-WIOT}} + \mathbf{f}_{\text{H-WIOT}} = \quad (4.6)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \bar{\mathbf{x}}_{\bar{y}_1^{35}} \\ \mathbf{x}_Y \\ \mathbf{x}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{11} & \mathbf{Z}_{1j} & \mathbf{Z}_{1Y} & - \\ \mathbf{Z}_{\bar{y}1} & \bar{\mathbf{Z}}_{\bar{y}\bar{y}} & \mathbf{Z}_{\bar{y}Y} & \mathbf{E}_{\text{NS}, \bar{y}_1^{35}} \\ \mathbf{Z}_{Y1} & \mathbf{Z}_{Yj} & \mathbf{Z}_{YY} & - \\ - & \mathbf{E}_{\text{SN}, \bar{y}_1^{35}} & - & \mathbf{Z}_s \end{bmatrix} \mathbf{i}_{\text{H-WIOT}} + \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{11} & \mathbf{f}_{1\bar{y}} & \mathbf{f}_{1Y} \\ \mathbf{f}_{\bar{y}1} & \bar{\mathbf{f}}_{\bar{y}\bar{y}} & \mathbf{f}_{\bar{y}Y} \\ \mathbf{f}_{Y1} & \mathbf{f}_{Y\bar{y}} & \mathbf{f}_{YY} \\ - & \mathbf{f}_{s,\bar{y}} & - \end{bmatrix} \mathbf{i}_{\text{H-WIOT}}$$

$$\mathbf{R}_{\text{H-WIOT}}(k \times (n_{\text{WIOT}} + s)) = [\bar{\mathbf{R}}_{\text{WIOT}}(k \times n_{\text{WIOT}}) | \mathbf{R}_s(k \times s)] \quad (4.7)$$

Il vettore delle risorse esogene è definito secondo l'eq. (4.7) e, ricordando il modello teorico delineato nella Sezione 3.2.2, $\mathbf{R}_{H-WIOT}$ contabilizza sia le m risorse esogene che i p flussi di scarto, chiamando genericamente k tutti gli impatti ambientali valutati.

Le matrici dirette $\bar{\mathbf{Z}}_{yy}$, $\bar{\mathbf{f}}_{yy}$, $\bar{\mathbf{x}}_{y1}^{35}$ vengono corrette opportunamente secondo le (3.33), (3.34), (3.35) con $\bar{n}$ che è unico e corrisponde al settore dell'economia italiana da cui viene disaggregato il sistema $\mathbf{S}$ oggetto dell'LCA. Analogamente ad esse anche $\mathbf{R}_{WIOT}$ va corretta per sottrazione (3.36). In questo modo si mantiene chiuso il bilancio (3.30) dopo aver reso ibrida la tavola WIOT.

La corretta disaggregazione del sistema $\mathbf{S}$ è un nodo cruciale del modello proposto. Esaminando la classificazione economica ISIC Rev.3 utilizzata nel WIOD, ci sono tre settori energetici [75]:

- *Mining and Quarring* (Cod. C). Include le attività di estrazione di materiali grezzi, che siano solidi (carbone o metalli), liquidi (petrolio) o gassosi (gas naturale). Generalmente sono comprese anche le attività di purificazione, asciugatura e altri trattamenti che vengono eseguiti in situ, prima della vendita dei prodotti. I prodotti di questo settore sono tipicamente destinati ai consumi intermedi;
- *Coke, Refined Petroleum and Nuclear Fuel* (Cod. 23). Rappresenta la fase intermedia della filiera energetica. Comprende le attività di trasformazione del petrolio (raffinazione), del carbone, del gas naturale e del combustibile nucleare. Oltre a queste attività manifatturiere vengono catalogate nel settore 23 anche il *decommissioning* delle scorie nucleari, così come i prodotti di scarto dei processi di trasformazione suddetti.
- *Electricity, Gas and Water Supply* (Cod.E). Comprende le attività di produzione e fornitura di vettori energetici alle utenze finali attraverso infrastrutture permanenti la cui dimensione non è discriminante. E' questo il settore più a valle della filiera energetica, che produce i servizi energetici destinati al consumo finale nazionale (fatta eccezione del combustibile per i trasporti terrestri e aerei che viene prodotto dal settore 23 e generalmente non trasportato da infrastrutture fisse).

In questa ricerca, l'assunzione con la quale si analizza l'efficienza energetica in ottica LCA è che l'energia primaria risparmiata agli usi finali è energia che il sistema paese non deve più fornire ai consumatori. Pertanto, alla luce del grado di aggregazione delle attività economiche della ISIC Rev.3, si è scelto di escludere i due settori relativi all'estrazione e al trattamento dei combustibili fossili, attribuendo l'efficienza energetica al settore E della distribuzione di gas naturale ed elettricità. Al diminuire delle dimensioni dell'intervento sarà sempre più ragionevole supporre che il beneficio - ovvero la diminuzione di domanda finale - venga avvertita quasi esclusivamente dal settore della distribuzione e non dalle attività economiche situate più a monte della filiera energetica. Ciò sarà ancor più realistico per un paese fortemente importatore di combustibili fossili come l'Italia poiché il settore estrattivo non è sviluppato in modo proporzionale al settore della distribuzione.

Una volta costruita la H-WIOT illustrata in Figura 4.3 è possibile applicare il modello di Leontief illustrato nella Sezione 3.2.2 per ricavare l'impatto ambientale totale della domanda finale che, in questo caso, mette in luce anche quello relativo al sistema $\mathbf{S}$. I vettori $\mathbf{R}$ sono

rappresentati in Figura 4.3 con colori diversi perché contabilizzano impatti ambientali differenti, ma possono essere riassunti nel vettore $\mathbf{R}_{\mathbf{H-WIOT}}(k \times (n_{\mathbf{WIOT}} + s))$.

$$\mathbf{A}_{\mathbf{H-WIOT}}((n_{\mathbf{WIOT}} + s) \times (n_{\mathbf{WIOT}} + s)) = \mathbf{Z}_{\mathbf{H-WIOT}} \hat{\mathbf{x}}_{\mathbf{H-WIOT}}^{-1} \quad (4.8)$$

$$\mathbf{L}_{\mathbf{H-WIOT}}((n_{\mathbf{WIOT}} + s) \times (n_{\mathbf{WIOT}} + s)) = (\mathbf{I}_{\mathbf{H-WIOT}} - \mathbf{A}_{\mathbf{H-WIOT}})^{-1} \quad (4.9)$$

$$\mathbf{B}_{\mathbf{H-WIOT}}(k \times (n_{\mathbf{WIOT}} + s)) = \mathbf{R}_{\mathbf{H-WIOT}} \hat{\mathbf{x}}_{\mathbf{H-WIOT}}^{-1} \quad (4.10)$$

In questo modo si arriva alla determinazione degli impatti ambientali specifico (4.11) e totale (4.12) dei prodotti di ogni settore economico e del sistema disaggregato.

$$\mathbf{e}_{\mathbf{H-WIOT}}((n_{\mathbf{WIOT}} + s) \times k) = \left[\frac{\mathbf{e}_{\mathbf{WIOT}}(n_{\mathbf{WIOT}} \times k)}{\mathbf{e}_{\mathbf{S}}(s \times k)} \right] = (\mathbf{B}_{\mathbf{H-WIOT}} \mathbf{L}_{\mathbf{H-WIOT}})^T \quad (4.11)$$

$$\mathbf{E}_{\mathbf{H-WIOT}}((n_{\mathbf{WIOT}} + s) \times k) = \left[\frac{\mathbf{E}_{\mathbf{WIOT}}(n_{\mathbf{WIOT}} \times k)}{\mathbf{E}_{\mathbf{S}}(s \times k)} \right] = \hat{\mathbf{f}}_{\mathbf{H-WIOT}} \mathbf{e}_{\mathbf{H-WIOT}} \quad (4.12)$$

$\mathbf{E}_{\mathbf{S}}(s \times k)$ rappresenta l'impatto ambientale totale del sistema $\mathbf{S}$ in termini di k categorie di impatto valutate ed è espresso secondo l'unità di misura appropriata per ogni indicatore scelto.

A questo punto gli impatti in termini di combustibile fossile consumato vengono sommati insieme secondo la (4.13), poiché la linearità del modello di Leontief suddivide proporzionalmente l'impatto tra gli m fossili in ingresso: questa non sembra un'informazione di particolare interesse fintanto che l'analisi viene eseguita in un'unica nazione, mentre potrebbe assumere rilevanza se si volesse confrontare lo stesso intervento in nazioni che si sostengono su mix di combustibili fossili differenti.

$$\mathbf{E}_{\text{fuel}} = \sum_{k=1}^m \mathbf{E}_{\mathbf{H-WIOT}}(n_{\mathbf{WIOT}} \times k) \quad (4.13)$$

Calcolo dell'impatto ambientale totale evitato durante la fase operativa dell'intervento

La formula (4.14) rappresenta la generica differenza di impatto ambientale tra la situazione precedente e successiva all'implementazione dell'intervento di efficientamento energetico.

$$\sum_{n_{\mathbf{H-WIOT}}} E_{\text{ex post}} - \sum_{n_{\mathbf{WIOT}}} E_{\text{ex ante}} \quad (4.14)$$

La configurazione *ex ante* viene calcolata sul sistema non perturbato, mentre per la $E_{\text{ex post}}$ del sistema occorre fare una scelta: può essere calcolata come sommatoria dei costi energetici della H-WIOT oppure della WIOT non ibrida, entrambi dopo aver introdotto uno *shock* di domanda (4.15) nel settore di pertinenza.

$$\Delta \mathbf{f} = -\mathbf{f}_S \quad (4.15)$$

La seconda opzione consente di evitare l'introduzione di un'ulteriore fonte di incertezza nel modello dovuto alla disaggregazione del sistema $\mathbf{S}$ dal proprio settore economico.

Per calcolare il reale impatto ambientale evitato durante la fase operativa dell'intervento si sceglie questa soluzione e si applica la IOA al caso di *shock* di domanda finale, secondo l'eq. (4.16), in cui l'impatto ambientale specifico dei settori produttivi non viene variato rispetto dalla realizzazione dell'intervento.

$$\Delta \mathbf{E}_{\text{H-WIOT}} = \Delta \hat{\mathbf{f}} (\mathbf{B}_{\text{H-WIOT}} \mathbf{L}_{\text{H-WIOT}})^T \quad (4.16)$$

La domanda finale del sistema $\mathbf{f}_S$ rappresenta un'energia primaria ed è quindi misurata in *ktep*, mentre la tavola WIOT è compilata in unità monetarie: per questo motivo $\mathbf{f}_S$ va convertita in dollari attraverso il proprio valore economico $\hat{\mathbf{p}}_S$, in linea con l'eq. (3.34).

Un risparmio energetico può derivare da un minor consumo di combustibili fossili o di energia elettrica. Poiché l'elettricità non è energia primaria, per una corretta valorizzazione della domanda finale sono perseguibili due strade:

- Viene convertita $\mathbf{f}_S$ in energia elettrica attraverso il rendimento medio del parco elettrico nazionale, coerentemente con la normativa, e si moltiplica l'energia secondaria per il prezzo medio al consumatore finale;
- Viene convertito il prezzo medio dell'energia elettrica in un'ipotetica energia primaria, sempre mantenendo la coerenza con la normativa italiana, e si moltiplica direttamente $\mathbf{f}_S$, lasciando immutato l'output dell'unità funzionale.

Se lo *shock* di domanda deriva da un risparmio di gas naturale o altri combustibili, $\mathbf{f}_S$ viene moltiplicata per il prezzo medio al consumatore finale di tale vettore energetico, utilizzando i PCI stabiliti dall'AEEGSI per la conversione.

Nella (4.16) $\Delta \mathbf{f} (n_{\text{WIOT}} \times 1)$ è un vettore non nullo soltanto nel settore *Electricity, Gas and Water Supply* italiano, perciò l'unico elemento di $\Delta \mathbf{E}_{\text{H-WIOT}}$ diverso da zero sarà proprio quello relativo al settore E , che viene definito $\Delta \mathbf{E}_E (1 \times k)$. Quest'ultimo è un vettore riga in cui le k colonne misurano categorie di impatto diverse.

Calcolo del bilancio dell'impatto ambientale totale netto a fine vita utile dell'intervento

Eseguire il confronto in una finestra temporale più ampia di un singolo anno attribuisce maggiore concretezza all'analisi, tuttavia debbono essere mantenute valide le forti assunzioni chiarite nella Sezione 4.2.1.

Per mantenere la coerenza con quanto definito dal *policy maker* italiano, il risparmio generato decresce negli anni con un tasso di decadimento δ stabilito dal GSE per gli interventi valutabili tramite ST-S [21,27] e descritto dalla eq. (2.5).

L'eq. (4.17) consente di calcolare il saldo ambientale netto che sperimenta il paese a fine vita utile del progetto implementato, in termini dei k indicatori d'impatto considerati.

$$\Delta E_{\text{net}}(1 \times k) = \left(\Delta E_E(1 \times k) + \sum_{i=2}^T (\Delta E_E(1 \times k))_{i-1} \cdot (1 - \delta_T) \right) - E_S(1 \times k) \quad (4.17)$$

- Il termine tra parentesi del membro di destra nella eq. (4.17) rappresenta il beneficio ambientale generato sul sistema paese durante la fase operativa grazie alla diminuzione del consumo energetico. ΔE_E è calcolato nel primo anno di vita utile $i = 1$ a partire dall'analisi dello *shock* di domanda finale Δf e viene proiettato lungo la vita T e ridotto attraverso il coefficiente δ . Può essere immaginato come un impatto ambientale lordo;
- All'impatto ambientale lordo viene sottratto l'impatto ambientale associato alla fase di realizzazione dell'intervento, calcolato tramite il modello H-WIOT.

E' possibile infine ricavare un *PayBack Time* (4.18) per ognuno degli indicatori di impatto ambientale trattato; questo non deve essere confuso con il tempo di ritorno dell'investimento.

$$\text{PBT} = \frac{E_S}{\Delta E_E} \quad (4.18)$$

Attraverso l'equazione del tipo (4.18) e le ipotesi formulate in precedenza è possibile misurare gli anni che la tecnologia installata impiega per ripagare il consumo di risorse primarie o le emissioni generate associati alla fase di realizzazione dell'intervento.

4.3. Analisi di inventario

4.3.1. Input del sistema

Le tavole WIOT monetarie sono compilate al prezzo corrente al consumatore finale. Nel caso in esame la domanda finale del sistema S rappresenta un'energia e il settore da cui viene disaggregata è il settore E (*Electricity, Gas and Water supply*) della nazione *Italia*. Perciò la domanda finale del sistema è stata valorizzata a partire dal prezzo medio al consumatore di tale energia nell'anno di riferimento.

Come dimostra la Tabella 2.2, tipicamente oltre l'86% dei risparmi energetici primari nel contesto italiano avvengono attraverso un risparmio di elettricità o di gas naturale: si è voluto differenziare questi due casi invece che unirli e fare considerazioni medie.

Si sono quindi ricercate le serie storiche relative all'andamento dei prezzi al consumatore finale da un report del regolatore italiano AEEGSI e considerati i prezzi relativi al 2010 [28,79].

- 15,9 $c€/kWh$ relativamente all'elettricità sono per la fascia di consumatori domestici tra 1000 e 2500 $kWh/anno$;
- 72,3 $c€/Sm^3$ relativamente al gas naturale per la fascia intermedia di consumatori domestici tra 525 e 5255 $Sm^3/anno$.

Tuttavia il coefficiente di interesse pratico deve essere espresso in $[M\$/ktep]$, coerentemente con le unità di misura del WIOD; sono perciò necessarie ulteriori precisazioni sui coefficienti di equivalenza utilizzati.

Il corrispettivo energetico tra kWh elettrico e tonnellata di petrolio equivalente ai fini del rilascio dei TEE è stabilita dall'Autorità attraverso la Delibera EEN 3/08 [30] pari a $0,187 \cdot 10^{-3} tep/kWh_{el}$, considerando quindi un rendimento complessivo del sistema nazionale di produzione e distribuzione dell'energia elettrica pari al 46%.

Per quanto riguarda il gas naturale bisogna passare per il Potere Calorifico Inferiore in condizioni standard $[T = 0^\circ C ; P = 1 bar]$, stabilito dal Ministero delle Attività produttive nel Bilancio energetico nazionale 2000. Le Linee Guida in materia di efficienza energetica fissano il PCI del gas naturale pari a $8250 kcal/Sm^3$, con 1 $kcal$ che corrisponde a $1,162 \cdot 10^{-3} kWh$ [27].

Il tasso di cambio tra dollaro ed euro nell'anno 2010 è oscillato tra 1,43 e 1,22 e ufficialmente viene considerato un valore medio ponderato di 1,33.

Come conseguenza, la domanda finale del sistema viene valorizzata da:

- 1,1273 $M\$/ktep$ se l'unità funzionale deriva da un risparmio di energia elettrica agli usi finali;
- 1,2396 $M\$/ktep$ se l'unità funzionale deriva da un risparmio di gas naturale agli usi finali.

Unità di misura	ST 2T	ST 3T	ST 5T	ST 6Ta	ST 6Tb	ST 7T	ST 8Ta	ST 8Tb	ST 9T	ST 17T	ST 27T	ST 36E	ST 37E	ST 39E	ST 40E
M\$	1,1273	1,240	1,240	1,240	1,240	1,1273	1,1273	1,240	1,1273	1,1273	1,206	1,1273	1,240	1,240	1,240

Figura 4.4 Shock di domanda finale Δf associato a ogni unità funzionale.

Lo shock di domanda finale causato dall'unità funzionale è attribuito al settore italiano *Electricity, Gas and Water supply* ed è riportato in Figura 4.4. A questa valorizzazione andrà aggiunto un margine di incertezza.

Bisogna ora caratterizzare nel dettaglio l'input economico dell'unità funzionale analizzata. Per stimare il costo di investimento associato alla realizzazione di ogni intervento analizzato si è fatto affidamento a diverse fonti:

- Preventivi reali;
- Cataloghi e listini di aziende produttrici;
- Report di settore;
- Ricerche di mercato.

[M\$]	ST 2T	ST 3T	ST 5T	ST 6T a	ST 6T b	ST 7T	ST 8T a	ST 8T b	ST 9T	ST 17T	ST 27T	ST 36E	ST 37E	ST 39E	ST 40E
AtB	0	0	0	0	0	0,019	0	0	0	0	0	0	0,040	0	0,023
C	0,005	0,004	0,004	0,164	0,307	0,305	0,008	0,013	0,012	0,060	0,013	0,003	0,048	1,161	0,007
15t16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17t18	0	0	0	0,157	0,205	0	0	0	0	0	0	0	0	0,116	0,001
19	0	0	0	0,157	0,205	0	0	0	0	0	0	0	0	0,116	0,001
20	0,036	0,029	0,195	0	0	0,003	0,026	0,044	0	0	0,080	0,007	0,040	0,406	0
21t22	0,036	0,017	0	0,136	0,136	0	0,006	0,011	0	0	0	0	0	0,116	0
23	0	0	0	0	0	0,007	0	0	0	0	0	0	0,008	0	0,002
24	0,091	0,087	0,177	2,827	3,410	1,109	0,153	0,218	0,151	0,086	0,288	0,269	0,605	2,031	0,068
25	0,911	0,651	0,355	3,069	3,581	0,888	0,192	0,262	0,121	0,690	2,404	0,374	0,806	3,192	0,113
26	0	0,014	5,320	0,863	1,159	6,657	3,197	5,451	0	0,431	0,481	0,015	0,484	1,509	0,056
27t28	0,364	0,419	0,621	0,996	1,166	0,516	0,128	0,218	0,301	0	2,404	0,042	0,846	11,722	0,203
29	3,644	7,951	0	0	0	0,055	0	0	0,603	0,431	19,229	0,523	12,091	0	0,789
30t33	0,273	0,477	0,053	0	0	2,891	0,153	0,262	2,035	2,250	3,846	3,930	0,101	0	0,019
34t35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
36t37	1,549	1,229	0,222	0,333	0,469	1,398	1,100	1,504	0,543	0,603	3,045	2,197	1,935	1,625	0,047
E	0,911	0,723	0,310	0,742	0,844	0,621	0,243	0,327	0,256	0,560	1,602	0,572	0,834	1,103	0,085
F	0,109	0,087	0,266	1,780	1,978	0,555	0,115	0,065	0,045	0,043	0,801	0,045	0,202	1,509	0,028
50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
51	0,073	0,058	0,053	0,409	0,614	0,061	0,013	0,022	0	0,017	0,160	0,009	0,020	0,464	0,018
52	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60	0,364	0,289	0,248	0,941	1,006	0,166	0,160	0,218	0,045	0,172	0,561	0,374	1,008	0,116	0,032
61	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
62	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
63	0,091	0,072	0,009	0,034	0,051	0,067	0,038	0,065	0,015	0,017	0,080	0,037	0,020	0,029	0,006
64	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,009	0	0	0	0	0
J	0,018	0,014	0,062	0,980	0,980	0,044	0,013	0,065	0	0,069	0,032	0,012	0,020	0,348	0,023
70	0	0	0	0	0	0,083	0	0	0	0	0	0	0	0	0
71t74	0,401	0,419	0,683	2,549	2,677	0,438	0,297	0,833	0,618	0,414	2,259	0,538	0,782	0,766	0,065
L	0,219	0,173	0,106	0,979	0,979	0,166	0,013	0,022	0,075	0,069	0,337	0,075	0,202	0,232	0,018
M	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,004	0	0,001
O	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabella 4.2 Costi di investimento delle unità funzionali disaggregati nella ISIC Rev.3.

I valori grezzi e globali ricavati da queste devono essere depurati da eventuali margini di utile e costi accessori e successivamente disaggregati nella classificazione delle attività economiche: inizialmente si è seguito lo standard di accounting ufficiale italiano [58], poi dalla NACE Rev.2 le voci di costo sono state aggregate nella ISIC Rev.3, così da essere compatibili con la struttura della WIOT.

La scomposizione del costo dell'unità funzionale come riportata in Tabella 4.2 corrisponde alla *Upstream Cutoff Matrix* inserita nel modello di analisi ibrida.

La difficoltà maggiore risiede nel ricavare percentuali di costo ragionevoli attribuite a beni e servizi meno tangibili quali, ad esempio, assicurazioni, noleggi, attività finanziarie e così via, fino ad arrivare al costo economico totale di un intervento.

Attualmente il *Decreto Certificati Bianchi* non prevede nessun obbligo da parte del soggetto obbligato di comunicare al GSE i costi sostenuti, ma viene lasciata la facoltà di farlo. Ne risulta che pochissimi operatori comunicano l'investimento; basti pensare che per i progetti a consuntivo sono stati comunicati gli investimenti al GSE soltanto nel 5% dei casi dall'inizio del meccanismo al 2013 [25].

4.3.2. Valori teorici di riferimento per le emissioni in atmosfera

Il metodo di accounting delle emissioni inquinanti adottato nel WIOD considera sia le *energy-related* che le *non-energy-related emissions*, secondo l'eq. (4.1). La valutazione dell'impatto ambientale secondo l'LCA proposto risulta differente rispetto al frequente metodo che consiste nell'associare le emissioni evitate al combustibile risparmiato grazie a pratiche di efficienza energetica, secondo l'eq. (4.19) [12].

Potrebbe risultare interessante confrontare i risultati ottenuti dall'LCA con alcuni valori teorici di riferimento, analogamente a quanto fatto per le risorse primarie, supportati anche dall'importanza attribuita a indicatori di questo tipo da parte delle politiche ambientali internazionali. Risulta complicato trovare dei valori di riferimento per eseguire un simile confronto per il consumo della risorsa idrica: ci si è quindi limitati a confrontare le emissioni climalteranti.

$$emissione(X) = \text{livello attività} \times \text{fattore di emissione}(X) \quad (4.19)$$

- X rappresenta l'inquinante che si vuole analizzare;
- il *livello di attività* è un'energia [J];
- il *fattore di emissione* (EF) è misurato in [kg/J] o suoi multipli. Il suo valore dipende dal vettore energetico e dalla tecnologia di combustione utilizzata.

Nel caso di risparmio energetico attraverso un minor consumo di energia elettrica bisogna considerare l'intero parco di produzione elettrica nazionale, composto da più combustibili e tecnologie di produzione. Sono state adottate alcune semplificazioni dovute ai dati a disposizione.

Relativamente ai fattori di emissione di CO_2 i coefficienti si sono ricavati dall'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) per i singoli combustibili [80].

Relativamente a emissioni acidificanti di NO_x e SO_x non sono stati trovati rapporti specifici sul sistema italiano, perciò si è deciso di riferirsi alle fonti del WIOD [81]. Vengono suddivise le tecnologie di combustione e la taglia tipica di riferimento.

Considerando il parco termoelettrico italiano, si sono assunte come tecnologie di riferimento turbine a gas, caldaie di grossa taglia e motori a combustione interna di taglie consone alla funzione di backup. La composizione del parco elettrico medio in Tabella 4.3 è stata ricavata dal report ISPRA [80] ed è relativa al 2010. Si fa notare come la produzione rinnovabile, per quanto ancora fosse circa la metà di quanto incide oggi, concorra ad abbassare notevolmente il coefficiente di emissione medio complessivo.

ITALIA 2010		% sul parco elettrico nazionale
<i>Produzione elettrica lorda totale</i>	302062 GWh	100%
Idroelettrica	54407 GWh	18%
Termoelettrica	231248 GWh	77%
Geotermica	5376 GWh	2%
Eolico + Fotovoltaico	11032 GWh	4%
<i>la produzione termoelettrica è composta da</i>		
Carbone	39734 GWh	13%
Gas naturale	152737 GWh	51%
Gas derivati	4700 GWh	2%
Prodotti petroliferi	9731 GWh	3%
Biomassa/RSU	23361 GWh	8%

Tabella 4.3 Composizione del parco di produzione elettrica.

L'incertezza più grande sulla stima dei fattori di emissione medi risiede nei gas derivati e nei prodotti petroliferi, sotto i quali sono racchiusi una serie di combustibili molto vari tra loro. Tuttavia la loro incidenza del 5% circa sulla produzione elettrica nazionale non causa grandi scostamenti sul valore medio finale. Il combustibile più utilizzato è, come noto, il gas naturale: per un maggior grado di dettaglio nel rapporto ISPRA viene anche condotta un'analisi del gas importato, caratterizzato da PCI e EF leggermente differenti.

ITALIA 2010	EF NOx		EF SOx		EF CO2	
la produzione termoelettrica è composta da						
Carbone	181	g/GJ	310	g/GJ	92	kg/GJ
Gas naturale	77	g/GJ	8,60	g/GJ	57	kg/GJ
Gas derivati	99	g/GJ	9,90	g/GJ	101	kg/GJ
Prodotti petroliferi	159	g/GJ	99	g/GJ	76	kg/GJ
Biomassa/RSU	77	g/GJ	45	g/GJ	31	kg/GJ
Gas naturale, uso domestico	45	g/GJ	1,4	g/GJ	57	kg/GJ

Tabella 4.4 Fattori di emissione (EF) medi dei combustibili fossili.

Gli interventi analizzati che risparmiano gas naturale vengono effettuati per la maggior parte in ambito edilizio e, per la restante, in ambito agricolo-industriale. Le tecnologie di riferimento sono soprattutto caldaie domestiche di piccola dimensione, ma si è voluto considerare anche la presenza di bruciatori più grandi che modificano leggermente in eccesso i valori di *EF*. E' quindi utilizzata come riferimento una sintesi dei valori registrati nell'indagine ARPA Lombardia (2003) sui bruciatori domestici e di media taglia.

La Tabella 4.4 mostra in definitiva i fattori di emissione utilizzati per i combustibili fossili [81].

Attraverso l'eq. (4.19) si arriva a determinare la quantità di inquinante *X* evitata teorica per unità di energia primaria risparmiata, derivante da un risparmio di energia elettrica o gas naturale. La Tabella 4.5 raccoglie tali valori di emissione di inquinanti, rispetto ai quali verranno confrontati i risultati dell'approccio LCA.

ITALIA 2010	EF NO _x	EF SO _x	EF CO ₂
Risparmio di elettricità	74 g/GJ 1,424 ton/ktep	52 g/GJ 1,00 ton/ktep	46 kg/GJ 0,884 kton/ktep
Risparmio di gas naturale	45 g/GJ 2,001 ton/ktep	1,4 g/GJ 0,062 ton/ktep	57 kg/GJ 2,546 kton/ktep

Tabella 4.5 Quantità di emissioni inquinanti evitate per unità di energia primaria.

4.3.3. Analisi di incertezza

Viste le numerose ipotesi sottostanti alla determinazione dei risparmi energetici e alla creazione del database, viene condotta, parallelamente al calcolo delle grandezze derivate, un'analisi dell'incertezza su queste ultime.

In letteratura [35] sono stati proposti dei metodi di perturbazione numerica sugli elementi della matrice dei coefficienti tecnici **A** e della matrice degli input **B**, con conseguente oscillazione del costo totale di produzione, al fine di tener conto dell'incertezza sull'economia mondiale. Tuttavia, poiché la WIOT ha una risoluzione dell'ordine del milione di dollari, mentre la dimensione dell'intervento può essere significativamente inferiore, è stata assunta priva di incertezza la tavola mondiale. La perturbazione della struttura economica mondiale avrebbe eclissato completamente l'incertezza caratteristica di ogni unità funzionale. La linearità dei modelli di Leontief e le incertezze sui dati in input al modello facilitano il calcolo della propagazione dell'errore.

La maggiore fonte di errore sui dati risiede nel costo di investimento dell'intervento: è stata assunta un'incertezza pari al 10% per ogni voce di costo, che si interfaccia con l'economia mondiale nella matrice di *Upstream cutoff*.

$$\begin{aligned}\varepsilon(\mathbf{E}_{\text{NS}}) &= 10\% \\ \Delta \mathbf{E}_{\text{NS}} &= \mathbf{E}_{\text{NS}} \cdot \varepsilon(\mathbf{E}_{\text{NS}})\end{aligned}\quad (4.20)$$

Essendo $\mathbf{E}_{\text{NS}}$ non nulla soltanto per la nazione Italia, anche $\Delta \mathbf{E}_{\text{NS}}$ sarà della stessa forma. Per semplicità si proseguiranno i calcoli con vettori della dimensione del solo paese Italia (35x1) poiché, grazie alla linearità dei modelli di Leontief, la propagazione dell'errore fino all'impatto ambientale totale $\mathbf{E}_{\text{H-WIOT}}$ non avviene in altri settori della WIOT.

Una seconda fonte di errore risiede nel prezzo dell'energia. Per stimarne l'incertezza si è analizzato l'andamento dei prezzi al consumatore finale nei 4 trimestri del 2010 rispettivamente per energia elettrica e gas naturale [79] e, coerentemente con quanto visto nella Sezione 4.2.3, questi sono stati ricondotti a energia primaria. Si è notato che l'oscillazione rilevata è nettamente inferiore alla corrispondente oscillazione dei prezzi all'ingrosso: ciò, oltre a dimostrare l'efficacia del ruolo dell'Acquirente Unico nel tenere stabili - e vantaggiosi - i prezzi dell'energia per il consumatore, mantiene limitata l'incertezza dovuta al prezzo sulle grandezze derivate.

Si sono ricavati i valori riportati nella (4.21):

$$\begin{aligned}\Delta(p_{el}) &= 0,3 \text{ c€} / kWh \\ \varepsilon(p_{el}) &= 1,9\% \\ \Delta(p_{gas}) &= 2,40 \text{ c€} / Sm^3 \\ \varepsilon(p_{gas}) &= 3,3\%\end{aligned}\quad (4.21)$$

Quindi, generalizzando tra gas naturale ed elettricità, l'incertezza sul prezzo è attribuito allo *shock* di domanda finale (4.22) e corrisponde all'incertezza sull'impatto ambientale annualmente evitato dal settore E .

$$\varepsilon(\Delta \mathbf{f}) = \varepsilon(p) \quad (4.22)$$

Dato che il sistema viene disaggregato dal proprio settore di appartenenza, secondo l'eq. (3.33), e che la $\mathbf{x}$ è data dal bilancio di produzione (3.5) allora allo stesso modo l'incertezza si riflette sulla produzione finale secondo la relazione (4.23).

$$\begin{aligned}\Delta \mathbf{x}_{\text{H-WIOT}} &= \Delta \mathbf{E}_{\text{ns}} \cdot 2 \\ \varepsilon(\mathbf{x}_{\text{H-WIOT}}) &= \Delta \mathbf{x}_{\text{H-WIOT}} / \mathbf{x}_{\text{H-WIOT}}\end{aligned}\quad (4.23)$$

Seguendo le formule del modello di Leontief, le incertezza si propaga nel modello H-WIOT come nelle equazioni (4.24).

$$\begin{aligned}\varepsilon(\mathbf{x}_{\text{H-WIOT}}) &= \varepsilon(\mathbf{L}_{\text{H-WIOT}}) = \varepsilon(\mathbf{B}_{\text{H-WIOT}}) \\ \varepsilon(\mathbf{e}_{\text{H-WIOT}}) &= \varepsilon(\mathbf{L}_{\text{H-WIOT}}) + \varepsilon(\mathbf{B}_{\text{H-WIOT}}) \\ \varepsilon(\mathbf{E}_{\text{H-WIOT}}) &= \varepsilon(\mathbf{e}_{\text{H-WIOT}})\end{aligned}\quad (4.24)$$

Poiché l'errore sul prezzo va attribuito esclusivamente al settore E di riferimento, nell'anno in cui viene realizzato l'intervento si registra una doppia componente di errore e vale la (4.25).

$$\varepsilon(\mathbf{E}_E)_1 = \varepsilon(\mathbf{e}_E) + \varepsilon(\Delta \mathbf{f}) \quad (4.25)$$

Visto che la WIOT è stata supposta priva di incertezza, risulta che l'errore sul $\Delta \mathbf{E}_{\mathbf{H-WIOT}}$ sia pari a quello sul vettore $\mathbf{E}_{\mathbf{H-WIOT}}$.

Tutti i settori sollecitati dal sistema $\mathbf{S}$ hanno incertezza non nulla, seppur dalla matematica dei modelli di Leontief il proprio impatto ambientale totale non subisca variazioni. Ciò ha portato ad attribuire l'incertezza accumulata in tutti i 34 settori italiani - ad eccezione del settore E che subisce lo *shock* di domanda - all'impatto ambientale del sistema $\mathbf{S}$ (4.26). D'altronde l'incertezza su quest'ultimo non sarebbe calcolabile diversamente poiché la matrice $\mathbf{Z}_S$ è nulla e la domanda finale $\mathbf{f}_S$ è l'unità funzionale ipotizzata a priori pari a 1 *ktep*.

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{E}_S &= \sum_{n_{WIOT}} \mathbf{E}_{n_{WIOT}} \\ \varepsilon(\mathbf{E}_S) &= \Delta \mathbf{E}_S / \mathbf{E}_S \end{aligned} \quad (4.26)$$

Se l'analisi è estesa all'intera vita utile, è necessario amplificare l'incertezza sulle grandezze derivate per T anni. Nel primo anno si avrà un'incertezza maggiore sul settore E , in accordo con la (4.25) e dovuta sia alla realizzazione dell'intervento e che allo shock di domanda finale; negli anni a seguire vale la (4.27).

$$\varepsilon(\mathbf{E}_E) = \varepsilon(\Delta \mathbf{f}) \quad (4.27)$$

$$\Delta(\Delta \mathbf{E}_{\text{net}}) = \Delta(\Delta \mathbf{E}_{E,1}) + \Delta(\Delta \mathbf{E}_E) \cdot (U-1) + \Delta(\Delta \mathbf{E}_E) \cdot (T-U) \cdot (1-\delta_T)^{T-U} + \Delta \mathbf{E}_S \quad (4.28)$$

Considerando la presenza del tasso di decadimento di prestazione δ , l'incertezza totale sul bilancio ambientale netto è calcolata attraverso l'eq. (4.28).

4.4. Analisi degli impatti e interpretazione dei risultati

Verranno motivate e descritte le categorie di impatto ambientale valutate, scelte tra quelle contabilizzate nel *World Input - Output Database*. Ogni categoria di impatto è associata ad un indicatore, che sarà assegnato al modello H-WIOT teorizzato ed infine quantificato. Quindi verranno discussi i risultati ottenuti.

Per ragioni di "pesantezza" computazionale le tavole WIOT e gli *accounting* dei combustibili fossili e ambientali sono state compilati in Microsoft Excel e successivamente importati ed elaborati in ambiente *Matlab® R2015b*. Nell'implementazione pratica del modello di Leontief, per lo stesso motivo, si è fatto uso dell'approssimazione a serie di potenze per il calcolo della *Matrice Inversa di Leontief*, come spiegato nella Sezione 3.2.2, onde evitare problemi numerici.

4.4.1. Categorie di impatto selezionate e rispettivi indicatori

All'interno del WIOD si distinguono sei banche dati, all'interno delle quali sono stati scelti gli indicatori di impatto utilizzati per la valutazione ambientale. Nonostante la ricchezza del database WIOD, non tutte le categorie di impatto sembrano efficaci per descrivere un progetto di efficientamento energetico.

Gli indicatori selezionati, raccolti nella Tabella 4.6, e quelli esclusi vengono opportunamente chiariti nel seguito.

- *Energy accounts*: contabilizzati per settore economico e vettore energetico, quantifica l'energia lorda a monte dei processi intermedi che concorrono alla produzione della domanda finale. Sono misurati in *ktep* ed i dati sono tratti dalla IEA [3,76]. L'obiettivo primario di questo lavoro è la valutazione energetica, pertanto si è fatto uso degli *energy accounts* disponibili;
- *Air emissions accounts*: suddivisi in emissioni di CO₂ e non-CO₂. In entrambi i casi sono contabilizzate come descritto dalla (4.1), mentre le sole emissioni legate allo sfruttamento energetico dei combustibili sarebbero deducibili dai bilanci energetici. Oltre alla CO₂ vengono presi in considerazione altri gas serra (CH₄, N₂O), acidificanti (NO_x, SO_x, NH₃) e gas responsabili della formazione di ozono (CH₄, CO, NMVOC⁴, NO_x). Le emissioni non-CO₂ non vengono fornite in maniera disaggregata, tuttavia la metodologia di calcolo è identica a quanto descritto per la CO₂. Sono misurati in *ton* - o in *kton* per la CO₂ - e i dati sono raccolti da diversi istituti scientifici nazionali e internazionali secondo lo standard NAMEA [47] e coerentemente armonizzati nella WIOT.

Dagli indicatori di emissioni atmosferiche si è scelto di escludere quei gas che hanno un impatto secondario in termini di quantità emesse, considerando che l'obiettivo è di analizzare non grandi manovre energetiche, ma singoli progetti.

Perciò sono state considerate le emissioni di anidride carbonica (in *kton*) e di acidificanti quali NO_x, SO_x.

- *Materials extraction accounts*: registrano l'estrazione e il conseguente utilizzo dei principali metalli e materiali non metallici da parte dei settori produttivi di ogni paese. Questo indicatore è stato escluso perché la scarsa risoluzione all'interno del database non sembra aggiungere valore all'analisi.
- *Land use accounts*: suddividendo il suolo in 4 tipologie (terra arabile, coltivazioni permanenti, pascoli e foreste), registrano lo sfruttamento delle stesse da parte dei settori produttivi. L'utilizzo di suolo appare poco efficace per descrivere un intervento in questo settore poiché per la maggior parte dei casi dall'intervento non vengono richieste risorse direttamente dal settore agricolo che è quello maggiormente *land-intensive*. L'impatto ambientale in termini di suolo utilizzato sarebbe pertanto marginale rispetto ad altri impatti ambientali.

⁴ Non-Methane Volatile Organic Compound

CATEGORIA	IMPATTO	INDICATORE	UNITA' DI MISURA
Energia	combustibili fossili	energia da combustibile	<i>ktep</i>
Ambiente	gas serra	emissioni CO ₂	<i>kton CO₂</i>
	gas acidificanti	emissioni NO _x	<i>ton NO_x</i>
		emissioni SO _x	<i>ton SO_x</i>
	sfruttamento idrico	acque blu utilizzate	<i>1000 m³</i>
Sociale	occupazione	persone coinvolte	<i>persone</i>
	ore di lavoro	ore di lavoro	<i>1000 ore</i>

Tabella 4.6 Categorie di impatto scelte per l'analisi del ciclo di vita

- *Water use accounts*: si suddivide in tre sottocategorie: vengono definite acque verdi quelle piovane e destinate all'irrigazione, acque grigie quelle che vengono utilizzate per bonificare ambienti e flussi di scarico inquinati e pertanto anch'esse destinate ad una ben determinata funzione.

La tipologia di risorsa idrica considerata in questa analisi è la cosiddetta *blue water* che si riferisce all'acqua disponibile nelle falde e nei bacini che viene utilizzata dalle attività economiche. Sono misurate in migliaia di metri cubi.

- *Socio - Economic accounts (SEA)*: è un database molto ampio, nato dal progetto EU KLEMS [77]. Per ogni settore economico e per ogni paese colleziona dati come il valore aggiunto, l'output totale, il compenso ricevuto dai lavoratori, ma anche la variazione del livello dei prezzi e dei volumi scambiati finali ed intermedi fino ad arrivare a contabilizzare il numero di lavoratori e le ore di lavoro per settore, suddivisi tra high, medium e low skilled. Ogni indicatore ha la più opportuna unità di misura; dal SEA sono stati valutati molteplici indicatori, ma si sono riscontrati alcuni problemi. Per alcune nazioni (ad esempio Cina e Resto del Mondo) ci sono dei dati mancanti, soprattutto quelli più aggiornati, facendo perdere affidabilità alle grandezze derivate. Suddividere lo studio di un sistema relativamente piccolo in *low*, *medium* e *high skilled* sembra poco affidabile e si è preferito condurre una valutazione più generica, basata sulle ore di lavoro e sul numero di persone coinvolte, attraverso indicatori che sono numeri assoluti; infatti tra ore di lavoro e livello di competenza non c'è una correlazione discriminante e per questo può essere utilizzato come indicatore assoluto. Riguardo la manodopera si è preferito considerare appunto le persone coinvolte (indicatori *EMP* e *H EMP*) invece degli impiegati per cogliere meglio la mobilitazione che sta dietro all'intervento analizzato: infatti per impiegati si intendono i lavoratori assunti a tempo indeterminato e le leggi in materia, variando di Stato in Stato, potrebbero creare confusione.

Ricordando la struttura della matrice delle risorse esogene **R** (3.14), le categorie d'impatto selezionate dal WIOD sono suddivisibili in due macrocategorie: **R_{fuel}** comprende i

combustibili fossili e $\mathbf{R}_{\text{env-soc}}$ include gli altri impatti ambientali e sociali. Pertanto è possibile inserire nella WIOT il vettore di risorse esogene descritto dalla eq. (4.29). Seguendo il modello di Leontief viene ricavata la matrice degli input (4.30).

$$\mathbf{R}_{\text{WIOT}}(k \times n_{\text{WIOT}}) = \left[\frac{\mathbf{R}_{\text{fuel}}(m \times n_{\text{WIOT}})}{\mathbf{R}_{\text{env-soc}}(p \times n_{\text{WIOT}})} \right] = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{\text{coal}, n_{\text{WIOT}}} \\ \mathbf{R}_{\text{crude oil}, n_{\text{WIOT}}} \\ \mathbf{R}_{\text{natural gas}, n_{\text{WIOT}}} \\ \mathbf{R}_{\text{CO}_2, n_{\text{WIOT}}} \\ \mathbf{R}_{\text{NOx}, n_{\text{WIOT}}} \\ \mathbf{R}_{\text{SOx}, n_{\text{WIOT}}} \\ \mathbf{R}_{\text{water}, n_{\text{WIOT}}} \\ \mathbf{R}_{\text{employment}, n_{\text{WIOT}}} \\ \mathbf{R}_{\text{work hours}, n_{\text{WIOT}}} \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

$$\mathbf{B}_{\text{WIOT}}(k \times n_{\text{WIOT}}) = \left[\frac{\mathbf{B}_{\text{fuel}}(m \times n_{\text{WIOT}})}{\mathbf{B}_{\text{env-soc}}(p \times n_{\text{WIOT}})} \right] = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{\text{coal}, n_{\text{WIOT}}} \\ \mathbf{B}_{\text{crude oil}, n_{\text{WIOT}}} \\ \mathbf{B}_{\text{natural gas}, n_{\text{WIOT}}} \\ \mathbf{B}_{\text{CO}_2, n_{\text{WIOT}}} \\ \mathbf{B}_{\text{NOx}, n_{\text{WIOT}}} \\ \mathbf{B}_{\text{SOx}, n_{\text{WIOT}}} \\ \mathbf{B}_{\text{water}, n_{\text{WIOT}}} \\ \mathbf{B}_{\text{employment}, n_{\text{WIOT}}} \\ \mathbf{B}_{\text{work hours}, n_{\text{WIOT}}} \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

L'unità funzionale della LCA è costituita da un unico intervento, di dimensione prestabilita, che causa un'espansione della WIOT di una riga e una colonna (4.31).

$$s=1 \rightarrow \mathbf{S}(1 \times 1) \quad (4.31)$$

La matrice delle transazioni $\mathbf{Z}_{\text{H-WIOT}}$ è completata dalla una matrice di *Upstream Cutoff* del tipo (4.4) di dimensioni $(n_{\text{WIOT}} \times 1)$, dalla matrice di *Downstream Cutoff* del tipo (4.5) nulla in quanto nessun prodotto fisico dell'intervento energetico è utilizzato come consumo intermedio di un qualsivoglia settore dell'economia mondiale e da una matrice $\mathbf{Z}_{\text{S}}$ unitaria nulla di autoconsumo interno al sistema.

Sulla base delle ipotesi effettuate, il vettore di risorse esogene $\mathbf{R}_{\text{S}}$ in ingresso al sistema $\mathbf{S}$ è nullo e conseguentemente lo sarà anche $\mathbf{B}_{\text{S}}$ (4.32) così da mantenere la *matrice degli input* costante rispetto alla situazione di sistema non perturbato.

$$\begin{aligned}\mathbf{R}_s(k \times 1) &= \mathbf{0}(k \times 1) \\ \mathbf{B}_s(k \times 1) &= \mathbf{0}(k \times 1)\end{aligned}\quad (4.32)$$

$$\begin{aligned}\mathbf{R}_{H-WIOT} &= [\mathbf{R}_{WIOT} \mid \mathbf{R}_s] \\ \mathbf{B}_{H-WIOT} &= [\mathbf{B}_{WIOT} \mid \mathbf{B}_s]\end{aligned}\quad (4.33)$$

Nel passaggio dal modello multiregionale al modello H-WIOT, si segue l'eq. (4.33).

Il risultato ottenuto dall'applicazione del modello di analisi *Input - Output* ibrido proposto è l'impatto ambientale totale dei prodotti dell'economia mondiale e dell'unità funzionale, secondo l'eq. (4.34).

$$\mathbf{E}_{H-WIOT}((n_{WIOT} + 1) \times k) = \left[\frac{\mathbf{E}_{WIOT}(n_{WIOT} \times k)}{\mathbf{E}_s(1 \times k)} \right] = \hat{\mathbf{f}}_{H-WIOT} \mathbf{e}_{H-WIOT} \quad (4.34)$$

$\mathbf{E}_{H-WIOT}$ ha dimensione $((n + 1) \times k)$; ad ogni k colonna della (4.34) viene assegnato il rispettivo indicatore d'impatto, mentre le $(n_{WIOT} + 1)$ righe rappresentano i settori dell'economia mondiale:

- $1 \leq k \leq 3$ rappresenta il consumo di energia primaria attribuito a tre combustibili fossili, rispettivamente carbone, petrolio e gas naturale;
- $k = 4$ ospita il costo in termini di emissioni di CO_2 ;
- $5 \leq k \leq 6$ rappresenta l'impatto in termini di emissioni acidificanti, rispettivamente in *ton* NO_x e *ton* SO_x ;
- $k = 7$ ospita lo sfruttamento idrico;
- $8 \leq k \leq 9$ rappresenta l'impatto sociale, valutato rispettivamente attraverso il numero di lavoratori coinvolti e le ore di lavoro.
- $n + 1$ ospita l'impatto ambientale globale del sistema S analizzato;
- $n = 752$ considerando le dimensioni della WIOT (4.3), è la riga di riferimento del settore italiano E : *Electricity, Gas and Water Supply*.
- $736 \leq n \leq 770$ sono i 35 settori produttivi dell'economia italiana sui quali viene caricato l'investimento economico sostenuto per implementare l'intervento.

E' opportuno ricordare che tra i dati in input si hanno le produzioni da fonte fossile separata, ma a valle dei procedimenti di calcolo si uniscono i risultati per valutarne l'impatto complessivo. Per questo si ha un unico impatto energetico (4.13), mentre in input si inseriscono tre vettori rappresentanti la produzione di carbone, petrolio e gas naturale.

Il combustibile nucleare, in accordo con la convenzione IEA non dovrebbe essere trattato con la stessa contabilità energetica degli altri in quanto, dal punto di vista dell'energia primaria, non è definibile con precisione da quale nazione venga estratto e prodotto [3]. Il modello proposto è aperto, pertanto, a contabilizzare anche il combustibile nucleare, ma nel caso studio non è stato considerato.

Al fine di avere una valutazione dell'impatto più ampia possibile, sono stati valutati anche gli impatti sociali connessi ad un progetto di efficienza energetica, anche se non è comunemente considerato un obiettivo primario dell'LCA [33,34,36]. Può essere interessante valutare il costo in termini di manodopera e ore di lavoro di un intervento, mentre l'impatto sociale misurato sottoforma di ore di lavoro evitate o posti di lavoro in meno a causa dello *shock* di domanda finale è un indicatore che si addice maggiormente a grandi manovre politiche nazionali [53,54,66]; sebbene la normativa sull'efficienza energetica e il nuovo impulso che arriverà dalle gare d'ATEM siano a tutti gli effetti grandi politiche nazionali, in questa tesi si intende valutare un singolo progetto di efficientamento energetico, che non genera un sensibile *shock* sull'occupazione nazionale. Per questo motivo si è valutato l'impatto sociale dell'intervento ($8 \leq k \leq 9; n = (n_{WIOT} + 1)$), ma si è ritenuto meno utile calcolarne il bilancio netto.

4.4.2. Impatto ambientale specifico di beni e servizi

Preliminarmente all'elaborazione dei risultati dell'LCA si intende fornire un quadro generale del sistema economico italiano valutando gli impatti specifici di ogni settore in funzione degli indicatori di impatto analizzati. Il vettore $\mathbf{e}_{ITA}$ è ricavato dalla $\mathbf{e}_{H-WIOT}$ calcolata con la (4.11) ed è relativo al sottosistema *Italia* (4.35).

$$\mathbf{c}_{ITA}(35 \times k) \in \mathbf{c}_{H-WIOT}(n_{WIOT} \times k) \quad (4.35)$$

Gli impatti specifici $\mathbf{e}_{H-WIOT}$ soffrono della perturbazione dovuta alla disaggregazione del sistema *S* dalla WIOT. Tuttavia lo scostamento rispetto al caso di sistema non perturbato è inferiore allo 0,1%, anche grazie alla dimensione ridotta del sistema *S* rispetto alla WIOT.

La Figura 4.5 rappresenta le diverse categoria d'impatto, ognuna caratterizzata da unità di misura differenti, con l'eccezione dell'impatto sociale, al fine di mettere in risalto la proporzionalità tra la manodopera e le ore di lavoro. I grafici sono riportati in scala logaritmica per una migliore rappresentazione. Dall'analisi dei costi specifici è possibile trarre alcune conclusioni che saranno utili per motivare i risultati elaborati per gli interventi scelti.

- Per le risorse naturali generalmente le attività economiche con costi specifici più alti sono quelle “più vicine” all'ambiente, le industrie pesanti, chimiche e i trasporti; meno *energy intensive* sono le industrie di precisione, i commerci ed i servizi in genere. Ciò vale per l'Italia e, con le dovute proporzioni, anche per le altre nazioni del mondo;
- Nel sistema economico italiano, il settore maggiormente CO_2 - *intensive* risulta essere quello dei trasporti, in particolare marittimi, seguito dai settori energetici e dalle attività di lavorazione di prodotti non metalliferi.
Riguardo ai trasporti è opportuno ricordare che si è ipotizzato di realizzare gli interventi in una zona ben dotata di infrastrutture proprio per non avere i costi di investimento dominati dal trasporto delle materie prime e, conseguentemente, perdere



Figura 4.5 Impatti specifici di beni e servizi per settore economico (ISIC Rev.3) e indicatore valutato.

la risoluzione dei risultati in altri settori che contraddistinguono maggiormente un progetto dall'altro;

- Ancora, il settore dei trasporti presenta i costi specifici più alti in relazione alle emissioni di NO_x e SO_x , in questo caso anche per via aerea. Dalla Figura 4.5 relativa alle emissioni di CO_2 ed acidificanti emerge la tendenza dei settori a seguire lo stesso trend di intensità di emissioni per ogni inquinante analizzato, tuttavia il rapporto tra di essi è variabile e ciò potrà rendere un intervento preferibile ad un altro a seconda della categoria di inquinante atmosferico considerato.
- Nell'economia italiana il settore *E* è il più dispendioso di acqua, dovuto anche al fatto che l'acqua è un prodotto finale del settore stesso, seguito dal settore agricolo e dall'attività estrattiva. Anche in questo caso è logico aspettarsi che un settore economico più "vicino" all'ambiente abbia costi specifici più elevati in relazione ad una determinata risorsa naturale.
- Osservando gli indicatori di impatto sociale si nota come questi abbiano andamenti completamente diversi dagli altri. Il motivo è da ricercare nel fatto che non si sta più analizzando una risorsa naturale, ma di altro tipo. Generalmente, infatti, l'approccio LCA si limita agli impatti ambientali e non considera indicatori sociali.
- Alcuni settori hanno un impatto specifico estremamente basso in termini energetici, di emissioni acidificanti e di consumo di acqua. In particolare ci si riferisce ai servizi personali privati (Cod. *P*).

4.4.3. Impatto ambientale associato alla fase di realizzazione dell'intervento

Attraverso l'applicazione del modello *Input - Output ibrido* si giunge alla quantificazione del dell'impatto ambientale totale di un'unità funzionale, $\mathbf{E}_S$.

La Figura 4.6 mostra i risultati in ordine progressivo di scheda tecnica attraverso cui sono codificati gli interventi ed in ordine dei k impatti analizzati. La Tabella 4.7 raccoglie i risultati numerici elaborati, corredati dall'incertezza $\Delta \mathbf{E}_S$ associata.

- Il dispendio di energia primaria di un intervento dipende principalmente dalle filiere produttive coinvolte nella realizzazione della domanda finale $\mathbf{f}_S$. Se le materie prime necessarie provengono da settori particolarmente energivori ci si aspetta che il costo energetico del progetto sia elevato: come si vede dalla Figura 4.5, generalmente le attività economiche con costi specifici più alti sono quelle "più vicine" all'ambiente. L'installazione di pannelli fotovoltaici (ST 7T), come è noto, necessita del silicio e dei dispendiosi processi di filiera ad esso legata, a partire dall'attività estrattiva fino ai trattamenti termici e chimici;
- In secondo luogo bisogna considerare su quante unità fisiche è necessario intervenire per raggiungere la soglia di risparmio energetico fissato come unità funzionale: il valore del risparmio specifico RSL è determinato a priori dal GSE nelle schede tecniche. Questo è il motivo per cui l'installazione di impianti solari termici (ST 8T) su un preesistente impianto elettrico (caso a) o a gas naturale (caso b) comporta un

dispendio energetico diverso tra loro di 0,7 *ktep* (pari al 22% dell'energia richiesta per la realizzazione della ST 6Ta), pur avendo un costo di investimento per impianto molto simile;

- Entrambe le precedenti considerazioni spiegano l'elevato consumo di energia primaria della ST 39E: un telo schermante per le serre è composto da un tessuto alluminizzato e materiale plastico, due prodotti di filiere particolarmente energivore, come mostra la Figura 4.5. Poiché il risparmio specifico attribuitogli dal GSE non è elevato bisogna installare molte unità e visto che il costo d'investimento di questo intervento è dominato dal costo del telo stesso, l'installazione dei teli schermanti fino al raggiungimento di 1 *ktep* annuo di risparmio energetico risulta il progetto energeticamente più dispendioso per il paese impegnando ben 7,3 *ktep* di energia primaria;
- L'incertezza associata a E_S è calcolata in accordo con l'eq. (4.26) ed è fortemente dipendente dal costo di investimento contenuto nella matrice di *Upstream Cutoff*;
- Tra i settori più CO_2 - *intensive* dell'economia italiana, come si legge dalla Figura 4.5 ci sono le attività di lavorazione di prodotti non metalliferi (Cod. 26). Fortemente dipendente da questo è la produzione di pannelli fotovoltaici e, per questo motivo, si registrano emissioni di CO_2 elevatissime nella realizzazione della ST 7T, benché il consumo di risorse primarie di tale progetto non sia ai livelli dell'installazione di teli schermanti per serre (ST 39E) o di pompe di calore per ACS (ST 27E);
- L'utilizzo di acqua di un intervento fornisce una misura della risorsa idrica totale consumata in fase di realizzazione. Dal relativo risultato elevato dell'installazione di pompe di calore (ST 27T), per il grado di aggregazione del modello, se ne deduce che le filiere di tale intervento consumino molto dal settore *E* o da settori come il 29 (*Machinery, Nec.*). Quest'ultimo, indagando all'interno della Z_{H-WIOT} , a sua volta utilizza in larga misura prodotti intermedi del settore energetico;
- Esaminando l'impatto sociale si può notare un trend degli interventi differente rispetto all'impatto energetico e ambientale poiché non si sta più valutando una risorsa naturale, ma una risorsa di altro tipo. Scompare la correlazione tra settore vicini all'ambiente e impatto ambientale specifico, ma diventa predominante la correlazione tra CAPEX e manodopera coinvolta nell'intervento, così come tra CAPEX e ore di lavoro richieste;
- Le ore di lavoro richieste sono proporzionali alla manodopera impegnata. Supponendo un impiego di 1600 *ore/persona/anno*, è possibile ricavare un valore di persone coinvolte nella realizzazione dell'intervento. Per tutti gli interventi analizzati tale valore rientra nell'intervallo di occupazione stimato dal modello proposto, includendo l'incertezza associata.

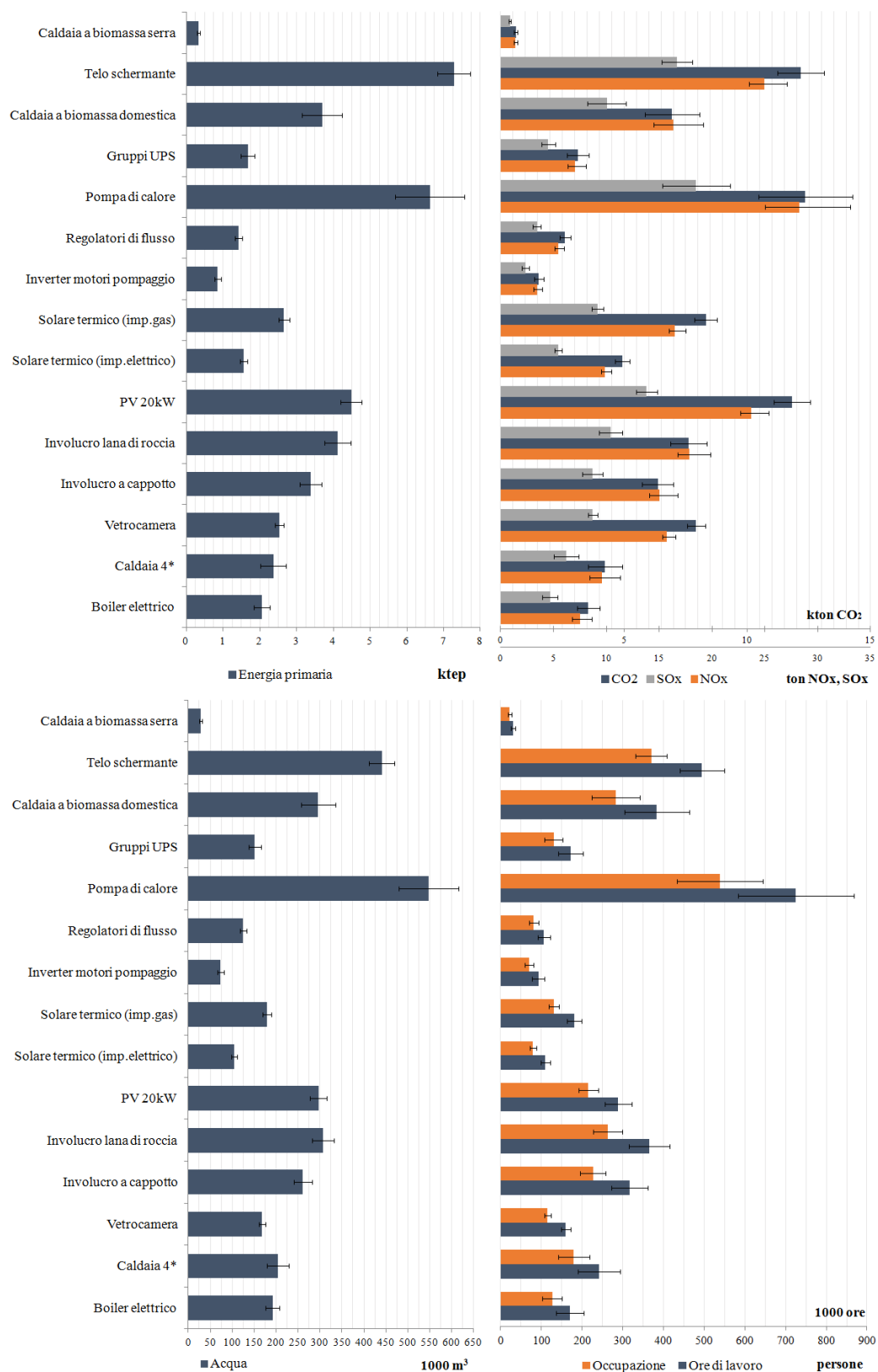


Figura 4.6 Impatto energetico, ambientale e sociale associato alla fase di realizzazione degli interventi.

Categoria di impatto	Unità di misura	ST 2T	ST 3T	ST 5T	ST 6T a	ST 6T b	ST 7T	ST 8T a	ST 8T b	ST 9T	ST 17T	ST 27T	ST 36E	ST 37E	ST 39E	ST 40E
Energia primaria	ktep	2,066	2,370	2,533	3,382	4,117	4,486	1,566	2,656	0,859	1,429	6,626	1,677	3,693	7,282	0,332
Incertezza	ktep	0,215	0,343	0,120	0,300	0,350	0,280	0,095	0,150	0,092	0,103	0,940	0,187	0,550	0,442	0,040
CO ₂	kton	3,549	4,227	7,919	6,369	7,630	11,815	4,931	8,322	1,539	2,613	12,350	3,131	6,953	12,173	0,607
Incertezza	kton	0,454	0,692	0,365	0,631	0,740	0,740	0,287	0,460	0,195	0,227	1,900	0,430	1,120	0,942	0,077
NOx	ton	7,493	9,549	15,713	15,040	17,850	23,700	9,837	16,490	3,457	5,436	28,220	6,994	16,300	24,930	1,364
Incertezza	ton	1,150	1,765	0,790	1,700	1,980	1,630	0,618	1,000	0,487	0,570	4,830	1,050	2,880	2,150	0,200
SOx	ton	4,682	6,187	8,708	8,706	10,400	13,810	5,460	9,160	2,335	3,429	18,490	4,510	10,040	16,674	0,864
Incertezza	ton	0,722	1,157	0,430	0,960	1,130	1,020	0,350	0,550	0,332	0,370	3,200	0,680	1,820	1,420	0,128
Acqua blu	1000 m3	193	204	169	261	307	297	105	179	74	125	547	152	296	441	28
Incertezza	1000 m3	16	25	7	21	25	19	7	10	7	8	68	14	39	29	3
Occupazione	persone	126	180	115	227	263	216	79	130	69	81	539	130	283	370	22
Incertezza	persone	25	38	8	31	36	24	8	12	11	12	105	23	59	39	4
Ore di lavoro	1000 ore	169	241	160	317	365	289	110	181	92	106	726	171	384	495	30
Incertezza	1000 ore	34	52	12	45	50	33	12	17	15	16	143	30	80	54	6

Tabella 4.7 Impatto energetico e ambientale associato alla fase di realizzazione degli interventi e incertezze.

4.4.4. Impatto ambientale annualmente evitato durante la fase operativa dell'intervento

Il beneficio energetico e ambientale generato annualmente dall'unità funzionale deriva da un risparmio energetico di 1 *ktep* introdotto nel modello come *shock* di domanda finale Δf . Poiché l'analisi è iniziata da un valore di risparmio di energia primaria stabilito dalla normativa italiana e viste le osservazioni mosse nei confronti di quest'ultima nella Sezione 2.4.3, è opportuno valutare se il risparmio energetico quantificato sia pari alla reale energia primaria risparmiata dal paese, calcolata secondo l'approccio LCA.

- La Figura 4.7 mette a confronto il risparmio annuale di energia primaria generato da un'unità funzionale secondo l'approccio LCA con quanto calcolato dalla normativa italiana (linea rossa);
- La differenza tra i due è da ricercare nella filiera del settore di distribuzione di elettricità e gas, sostenuta da risorse primarie fossili;
- Quando il settore *E* italiano subisce una riduzione di domanda finale, a sua volta utilizzerà una minor quantità di risorse e di prodotti intermedi degli altri settori. Questo effetto di filiera può essere colto dall'approccio LCA, diversamente dall'attuale metodologia di calcolo del risparmio energetico. Dall'applicazione del modello proposto, risulta che il paese beneficia di un risparmio energetico superiore a quanto certificato;

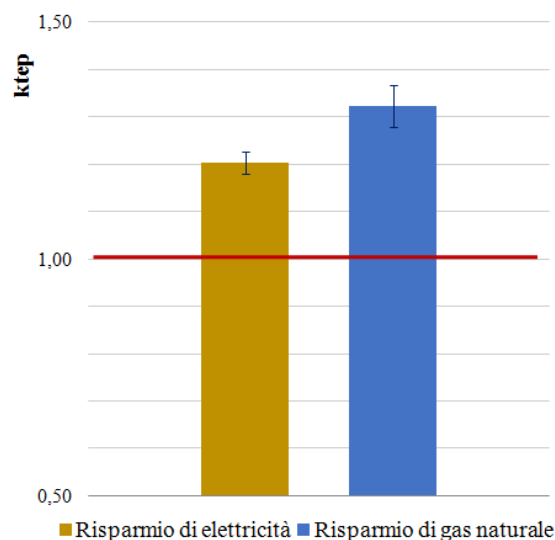


Figura 4.7 Risparmio energetico annuale di un'unità funzionale sul sistema italiano.

- L'incertezza associata ΔE_E è dovuta solamente all'oscillazione del prezzo dell'energia nell'anno di analisi, calcolata secondo la (4.22) e non all'incertezza sul costo economico dell'intervento. Infatti, nell'analisi dello *shock* di domanda, il

risparmio energetico può essere idealmente immaginato come un interruttore che “spegne” un consumo energetico senza alcun dispendio energetico associato [82];

- La differenza tra il risultato nel caso di risparmio di gas e nel caso di risparmio di energia elettrica è dovuta alla differente valorizzazione della domanda finale f_S che deriva dai prezzi medi al consumatore finale dei vettori energetici risparmiati.

Come per la valutazione energetica, nel corso della vita utile il dispositivo evita una certa quantità di emissioni inquinanti in atmosfera. Il riferimento teorico per le emissioni evitate, in linea con diversi report di settore, corrisponde alle emissioni evitate dalla mancata combustione di fossili, dovuta ad una unità funzionale [12,83]. I valori delle emissioni risparmiate di riferimento per unità di energia primaria sono raccolti nella Tabella 4.5.

Come già evidenziato nella Sezione 2.4.3, non è presente una normativa ufficiale con cui confrontare i risultati, perciò si tratta di un puro esercizio teorico con cui valutare la bontà del modello LCA proposto.

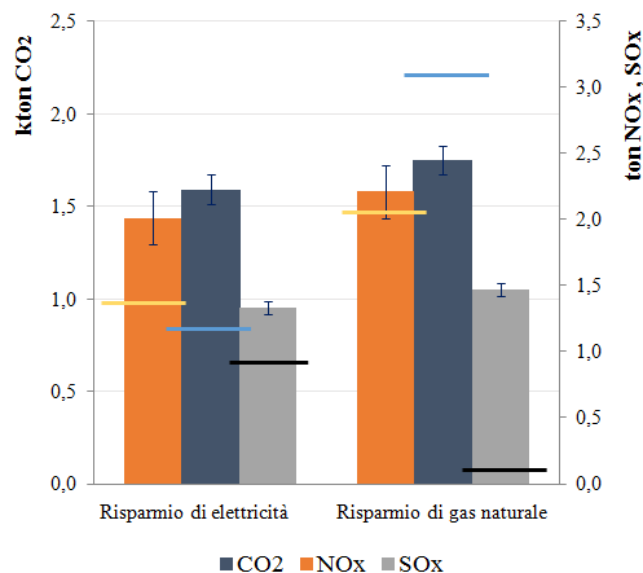


Figura 4.8 Emissioni annualmente evitate da un'unità funzionale sul sistema italiano.

- Le barre in Figura 4.8 rappresentano le emissioni di inquinanti evitate secondo un approccio LCA, mentre le linee orizzontali rappresentano il valore teorico di riferimento;
- Come è lecito aspettarsi, nella Figura 4.8 si verifica una situazione simile a quanto visto nel caso dell'energia. Tuttavia questi risultati sono fortemente influenzati dalle ipotesi sui fattori di emissione, oltre che sulla composizione del parco elettrico medio italiano;
- Da un'unità funzionale di elettricità si evitano emissioni superiori rispetto a quelle teoriche, sia per le ragioni di filiera, come chiarito in Figura 4.7, sia a causa del fatto

che il metodo di accounting WIOD considera anche la componente di emissioni non legate alla combustione, come illustrato nell'eq. (4.1). Quest'ultima contribuisce ad accrescere il beneficio ambientale sperimentato annualmente dal paese;

- Il valore più singolare è l'emissione di anidride carbonica evitata dal risparmio di gas naturale: per fare chiarezza su questo risultato si pensi al valore di riferimento calcolato secondo l'eq. (4.19) come una certa quantità di gas naturale che non viene più bruciato. Il metodo LCA proposto considera, invece, l'intero settore di *distribuzione dell'energia* che è sostenuto da svariate fonti energetiche.

Se diminuisce la domanda finale, diminuirà la “richiesta” energetica del settore e ciò avverrà in maniera proporzionale su tutti i combustibili che lo alimentano, non soltanto sul gas naturale. Come si può notare dalla Tabella 4.4, il gas naturale ha un $EF(CO_2)$ intermedio tra le fonti fossili, ma non va dimenticato che il sistema italiano energetico nell'anno 2010 era già fortemente basato su fonti rinnovabili.

La presenza di fonti energetiche rinnovabili viene implicitamente considerata nel calcolo del riferimento di emissioni evitate nel caso di risparmio energetico elettrico poiché il fattore medio di emissione è una media ponderata rispetto all'incidenza di ogni fonte energetica in Tabella 4.3, mentre nel caso di risparmio di gas naturale viene preso soltanto il combustibile puro;

- Con riferimento ancora alla Figura 4.8 si potrebbe, quindi, obiettare per quale motivo i valori di emissioni acidificanti calcolati per il risparmio di gas naturale in ottica LCA siano superiori ai riferimenti teorici.

Per gli NO_x la risposta è da ricercare nelle tecnologie di combustione. Il risparmio di gas naturale avviene nella maggior parte dei casi in ambito civile e, pertanto, attraverso caldaie domestiche o bruciatori di medio-piccola taglia: questi solitamente prevedono coefficienti di ossidazione e controlli di temperature tali per cui la produzione di ossido di azoto viene contenuta.

Lo zolfo, invece, non è un elemento solitamente presente in percentuali sensibili nel gas naturale e per questo il valore di riferimento è basso. D'altra parte, il settore energetico non fa affidamento solo sul gas, ma anche su combustibili, come il carbone, composti in maniera sensibile da zolfo. Per questo motivo, in ottica LCA, la riduzione di SO_x da interventi di risparmio di gas naturale è sensibile e ben superiore a quanto calcolabile dalla correlazione lineare tra combustione ed emissione.

4.4.5. Bilancio ambientale netto a fine vita utile

Il bilancio ambientale netto, sperimentato dal sistema paese a fine vita utile dell'intervento, viene valutato in accordo con la (4.17), come la somma dei due contributi valutati singolarmente in precedenza: l'impatto ambientale associato alla fase di realizzazione dell'intervento e l'impatto ambientale annualmente evitato.

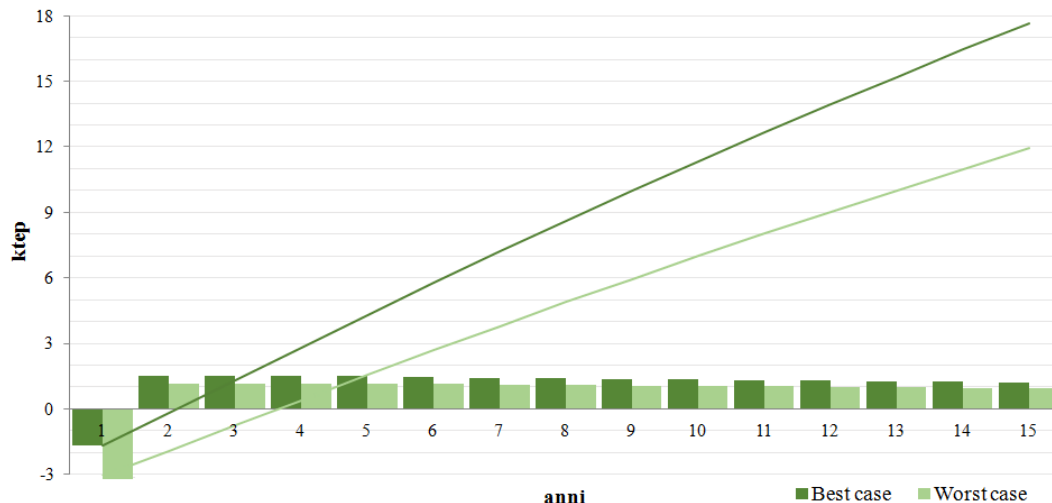


Figura 4.9 Risparmio energetico generato negli anni dalla ST 37E.

Analizzando in un primo momento il solo consumo di risorse primarie, la Figura 4.9 rappresenta il risparmio energetico conseguito negli anni dalla realizzazione di un impianto di riscaldamento domestico alimentato a biomassa legnosa (ST 37E).

- A causa dell'incertezza presente nel modello proposto si avrà uno scenario medio, compreso tra scenari di *best case* e *worst case*, indicati in Figura 4.9. In questo caso $\Delta(\Delta E_{NET})$ dipende sia dall'impatto associato al sistema S che all'impatto ambientale totale evitato durante la fase operativa, in accordo con la (4.28);
- Evitare di considerare il decadimento dei risparmi energetici nella (4.28) introduce un errore, rispetto alla stima corretta, inferiore al 2% su ogni intervento analizzato e può essere ritenuta un'approssimazione accettabile;
- Ogni intervento ha una propria vita tecnica caratteristica, mentre il tasso di decadimento è comune a tutti [21,27]. Dalla Figura 4.9 si può cogliere la diminuzione annuale dei risparmi generati tra la vita utile U e la fine della vita tecnica T e la conseguente diminuzione di pendenza della retta che registra i risparmi energetici cumulati. Il cambiamento del trend non è repentino poiché la normativa stabilisce un δ pari al 2% annuo;
- Il saldo finale è positivo per la caldaia a biomassa e ci si aspetta che sia tale per tutti i progetti. Il dispendio energetico iniziale dovuto alla realizzazione dell'intervento viene compensato negli anni: nel caso dell'installazione di caldaie a biomassa domestiche (ST 37E) si raggiunge il *PayBack Time* energetico nel terzo o nel quarto anno di vita utile, a seconda dello scenario considerato;
- I *PayBack Time* energetici degli interventi analizzati, come si evince dalla Tabella 4.8 sono tutti inferiori a 5 anni, ad eccezione dell'installazione di pompe di calore per la produzione di ACS (ST 27T) e di teli schermanti per serre (ST 39T); i *PayBack Time* energetici, sulla base di report di settore, sono decisamente più brevi dei tempi di ritorno economico dei progetti stessi [17,83].

La stessa logica può essere applicata agli altri impatti ambientali, dalle emissioni di inquinanti in atmosfera al consumo di acqua. Come già chiarito nella Sezione 4.4.1, non viene valutato il bilancio a fine vita utile relativo agli indicatori di impatto sociale poiché non ritenuti abbastanza efficaci.

ΔE_{NET} quantifica il saldo totale degli indicatori di impatto ambientale considerati. Nella Figura 4.10 e nella Tabella 4.8 sono rappresentati i valori ottenuti, accompagnati da un'incertezza valutata secondo la (4.28).

- Il parametro principale da cui dipende il bilancio finale è la lunghezza della vita utile T del dispositivo, la quale è stabilita dalla normativa italiana;
- Analizzando gli interventi a parità di T emerge come il consumo di risorse primarie localizzato nel primo anno sia una discriminante importante sul bilancio energetico netto del paese;

Da un punto di vista energetico si può notare come l'installazione di inverter in motori adibiti al pompaggio (ST 9T), pur avendo la stessa vita e gli stessi risparmi generati annualmente, dovrebbe essere preferita rispetto alla sostituzione di boiler domestici elettrici (ST 2T) a causa del minor costo energetico dell'intervento. Parimenti, il dispendio di energia iniziale dovrebbe far preferire la realizzazione di caldaie a biomassa per sistemi serricoli (ST 40E) all'installazione di impianti PV (ST 7T), nonostante a questi ultimi venga attribuita una vita tecnica superiore di 5 anni rispetto alle caldaie a biomassa;

- Il grafico relativo agli altri impatti ambientali in Figura 4.10 mostra che, cambiando i costi specifici di ogni settore economico per ognuno degli p impatti analizzati, l'ordine di preferenza degli interventi sulla base del bilancio netto varia rispetto al bilancio energetico;
- Analizzando la Figura 4.6 e la Tabella 4.8 si nota che gran parte degli interventi generano quantità considerevoli di emissioni in atmosfera, in particolar modo di CO_2 , ben superiori a quanto la diminuzione di domanda finale faccia risparmiare al paese in un anno. Pertanto si avrà un *PayBack Time* superiore all'unità e generalmente superiore al *PayBack Time* energetico;
- Un discorso analogo riguarda il consumo di acqua. La risorsa idrica impiegata nella realizzazione dell'intervento sarà "ripagata" dal consumo di acqua evitato negli anni. In questo caso, però, il *PayBack Time* si mantiene generalmente al di sotto dei 3 anni;
- Alcuni interventi possono presentare un bilancio ambientale netto di poco superiore allo zero, come nel caso delle emissioni acidificanti evitate dalla realizzazione della ST 27T, a causa dell'elevato impatto ambientale dell'intervento stesso. In questo caso l'incertezza, che è proporzionale all'investimento iniziale, può generare anche valori negativi del bilancio finale. Questi, per chiarezza di rappresentazione, non sono stati inseriti nella Figura 4.10, tuttavia il loro significato fisico è un tempo di ritorno superiore alla vita utile stimata dalla normativa. Infatti nello scenario peggiore l'installazione di pompe di calore per la produzione di ACS presenta un *PBT* di 18 anni per le emissioni di NO_x e 19 per quelle di SO_x .

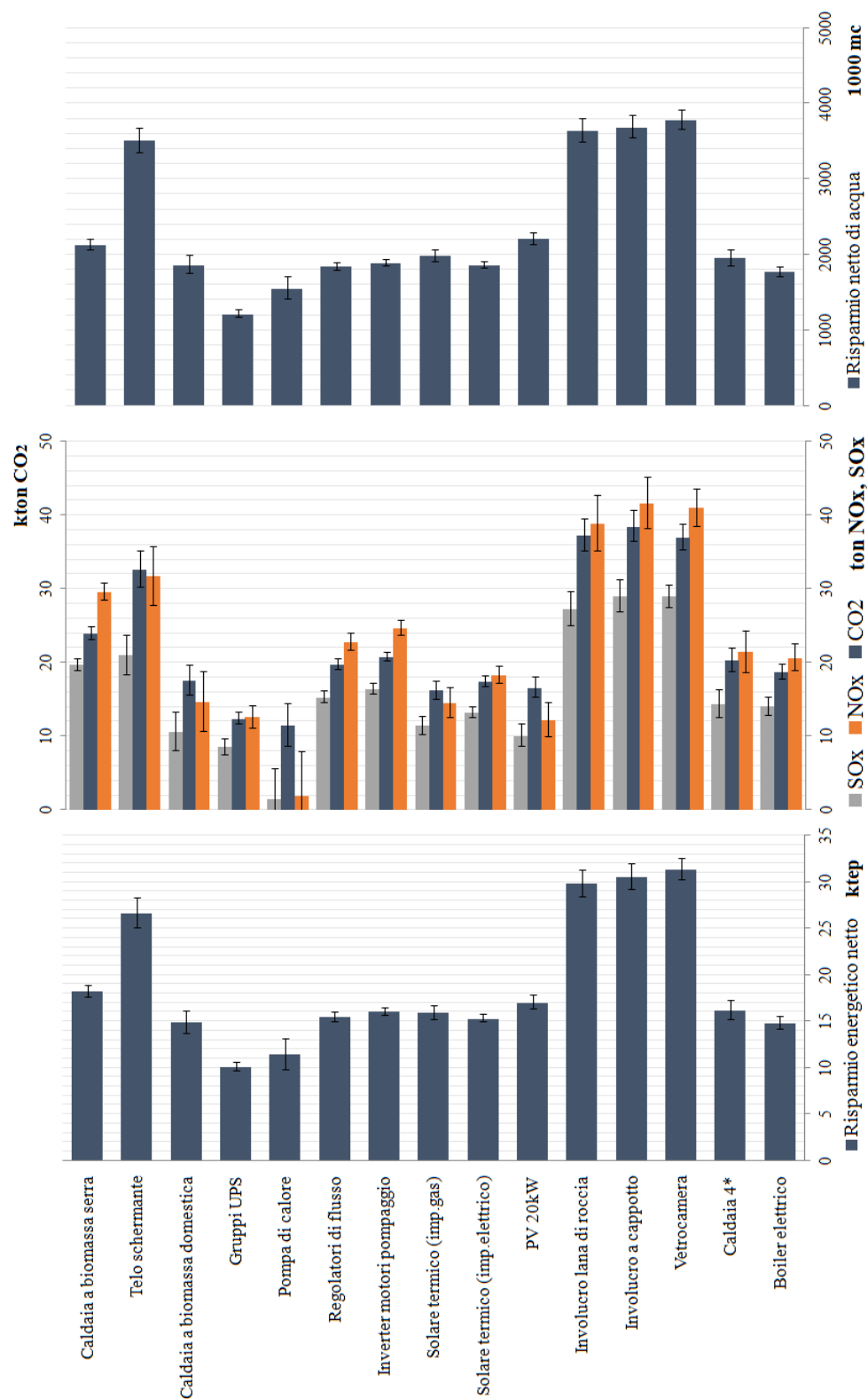


Figura 4.10 Bilanci ambientali netti a fine vita tecnica.

Categoria di impatto	Unità di misura	ST 2T	ST 3T	ST 5T	ST 6T a	ST 6T b	ST 7T	ST 8T a	ST 8T b	ST 9T	ST 17T	ST 27T	ST 36E	ST 37E	ST 39E	ST 40E
Energia primaria	kep	14,74	16,11	31,33	30,48	29,75	16,95	15,24	15,83	15,95	15,38	11,36	10,01	14,79	26,58	18,15
Incertezza	kep	0,65	1,03	1,15	1,39	1,46	0,74	0,42	0,78	0,43	0,48	1,67	0,49	1,26	1,58	0,64
PBT Best case	anni	1	1	2	2	3	3	1	2	1	1	4	1	2	4	0
PBT Worst case	anni	2	2	2	3	4	4	1	2	1	1	7	2	4	7	0
CO ₂	kton	18,7	20,2	36,9	38,4	37,2	16,5	17,3	16,1	20,7	19,6	11,4	12,3	17,5	32,6	23,8
Incertezza	kton	1,0	1,6	1,7	2,1	2,2	1,3	0,7	1,3	0,6	0,7	2,9	0,8	2,0	2,5	0,9
PBT Best case	anni	2	2	4	3	3	6	3	4	1	1	5	2	3	6	0
PBT Worst case	anni	3	3	5	5	5	9	3	5	1	2	11	2	5	9	0
NO _x	ton	20,6	21,3	40,9	41,6	38,8	12,1	18,3	14,4	24,6	22,7	1,8	12,5	14,6	31,7	29,5
Incertezza	ton	1,8	2,9	2,5	3,5	3,8	2,4	1,1	2,0	1,0	1,2	6,0	1,5	4,0	4,0	1,2
PBT Best case	anni	3	3	6	6	7	10	4	7	1	2	9	3	6	9	1
PBT Worst case	anni	5	6	8	8	10	14	5	8	2	3	18	4	10	14	1
SO _x	ton	14,0	14,3	28,9	28,9	27,2	10,0	13,2	11,4	16,3	15,2	1,5	8,5	10,5	20,9	19,7
Incertezza	ton	1,2	1,9	1,6	2,2	2,4	1,5	0,7	1,2	0,7	0,8	4,0	1,1	2,6	2,7	0,8
PBT Best case	anni	3	3	5	5	6	9	4	6	1	2	9	3	5	9	0
PBT Worst case	anni	5	6	7	7	9	12	5	7	2	3	19	4	9	15	1
Acqua blu	1000 m ³	1764	1948	3774	3681	3636	2200	1852	1973	1883	1832	1546	1209	1856	3502	2124
Incertezza	1000 m ³	66	105	127	148	153	72	44	83	46	52	153	49	121	162	72
PBT Best case	anni	1	1	1	1	2	2	1	1	0	1	3	1	1	2	0
PBT Worst case	anni	2	2	1	2	2	2	1	1	1	1	5	1	2	4	0

Tabella 4.8 Bilanci ambientali netti a fine vita tecnica e incertezze.

4.4.6. Confronto con la metodologia in uso

Il risparmio energetico netto definito secondo l'eq (4.17) presenta una differenza con l'omonima definizione stabilita dalla normativa italiana. Secondo il GSE “*netto*” sta ad indicare un miglioramento di efficienza rispetto ad una *baseline* tecnologica, ma non coglie l'energia primaria utilizzata dall'intervento stesso. Nell'approccio presentato in questa tesi, accettando l'esistenza del coefficiente di durabilità α , la qualità di “*netto*” indica l'aver considerato - ed escluso dal risparmio energetico complessivo - l'energia primaria richiesta per realizzare l'intervento.

Nel corso del capitolo si è mantenuta la coerenza con il meccanismo italiano al fine di confrontare i risultati ottenuti dalla proiezione dell'impatto energetico con quanto verrebbe certificato dal GSE.

- Il grafico in Figura 4.11 ordina gli interventi sulla base del risparmio energetico netto generato. Questo è accompagnato da un margine d'incertezza e ad esso è affiancato il risparmio certificato, fisso e calcolato dall'eq. (2.2) per ogni anno di vita utile U .

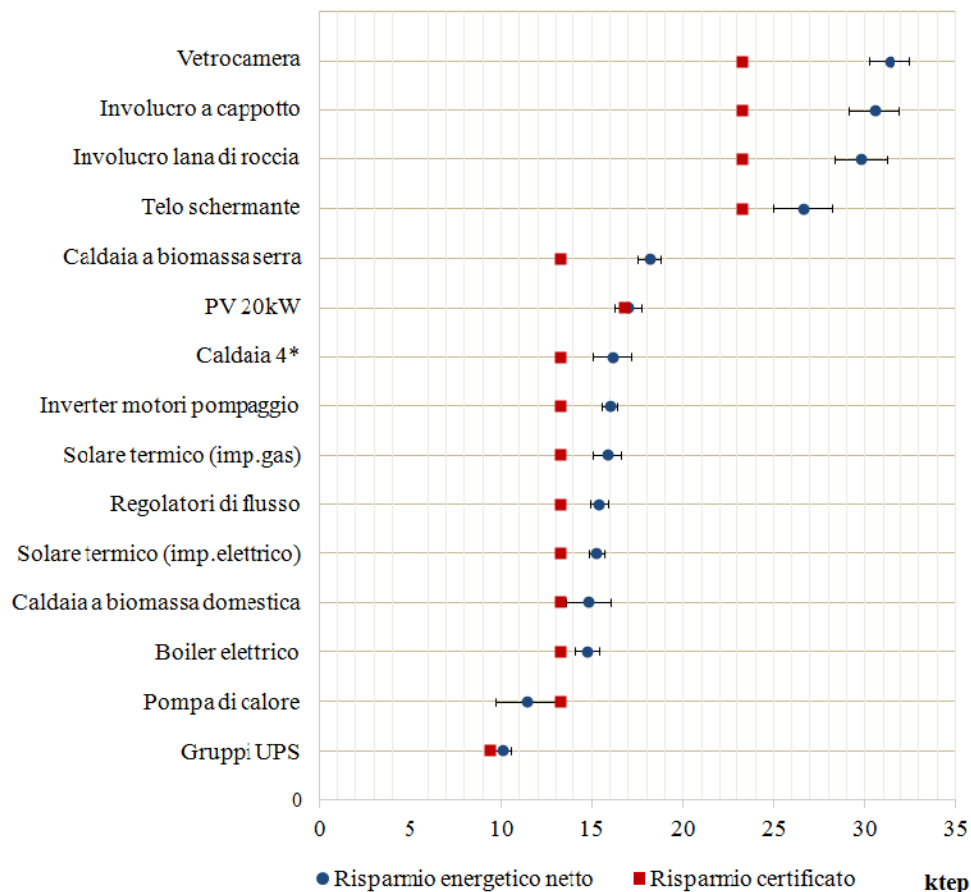


Figura 4.11 Confronto tra risparmio energetico netto e risparmio energetico certificato.

- Si nota che, generalmente, il risparmio energetico di cui beneficia il paese risulta essere, in accordo con la metodologia impiegata, maggiore di quanto il GSE certifichi ai privati;
- L'impatto ambientale associato alla fase di realizzazione e l'impatto ambientale evitato durante la fase operativa danno due contributi opposti alla differenza tra i risultati delle due metodologie. Poiché, generalmente, il risparmio energetico ottenuto in ottica LCA è più elevato rispetto a quanto calcolato dal GSE, è possibile affermare che l'inclusione della filiera produttiva all'interno della valutazione ha una rilevanza maggiore rispetto alla valutazione del dispendio energetico in fase di realizzazione dell'intervento;
- La discrepanza è tanto più alta, quanto più lunga è la vita tecnica T del dispositivo installato. La rappresentazione fornita in Figura 4.11 consente di visualizzare immediatamente gli interventi a cui viene attribuita la stessa vita utile. In particolare i più alti risparmi si avranno per interventi quali la sostituzione di vetri semplici con doppi vetri (ST 5T), la coibentazione dell'involucro edilizio (ST 6T a,b) e l'installazione di teli schermanti per serre (ST 39T);
- Quando l'impatto ambientale della fase di realizzazione dell'intervento E_s risulta avere un valore particolarmente elevato, come nel caso delle pompe di calore (ST 27T), la differenza tra i due contributi del bilancio netto tende ad annullarsi;
- Per buona parte degli interventi analizzati il risparmio quantificato nell'arco della vita utile attraverso la metodologia del GSE è simile a quanto calcolato dall'analisi del ciclo di vita o leggermente inferiore. Tuttavia, per interventi con vita utile estesa o con consumo energetico in fase di realizzazione minimo, ad esempio l'installazione di caldaie a biomassa per serra (ST 40E), la distanza tra i due approcci appare non trascurabile;

In ultima istanza si vuole evidenziare come, attraverso l'analisi del ciclo di vita, possa variare il criterio di scelta degli interventi da parte di un proponente. Nel Capitolo 2 si è più volte detto che il quadro normativo attuale consente ai soggetti obbligati di scegliere gli interventi di efficientamento energetico sulla base del costo di investimento da affrontare, a partire da quelli che garantiscono il raggiungimento del risparmio energetico obiettivo al minor costo economico [26]. Come emerso da report di settore, un significativo *driver* di scelta dei progetti è il rapporto $TEE/CAPEX$ [25,83]. Perciò si è voluto confrontare l'ordinamento dei 15 interventi campione secondo tale indicatore con quanto emerso dall'analisi di ciclo di vita proposta.

Si sono normalizzati secondo l'eq. (4.36) i risultati elaborati attraverso l'LCA creando un indice normalizzato I per ogni indicatore di impatto considerato.

$$I = \frac{\text{valore} - \text{valore min}}{\text{valore max} - \text{valore min}} \quad (4.36)$$

L'indice I può rappresentare un “criterio di scelta” e vale 0 per il progetto peggiore, crescendo fino a 1 per quello preferibile. Per mantenere coerenza di rappresentazione, se

l'indicatore è un *costo* energetico o ambientale viene calcolato il complemento a uno. La Figura 4.12 raccoglie soltanto gli indici *I* ritenuti più interessanti ed elaborati per gli interventi campione. In ordinata gli interventi sono ordinati secondo il rapporto *TEE/CAPEX* crescente.

- Il rapporto *TEE/CAPEX* è proporzionale al costo di investimento dei progetti e segue una logica di preferenza economica. Attraverso l'approccio LCA emerge come differenti criteri di scelta portino a preferire interventi diversi;
- Oltre ad esso, in Figura 4.12 sono riportati gli indici *I* relativi al consumo energetico in fase di realizzazione, e i bilanci netti in termini di energia primaria ed emissioni di CO₂;
- Analizzando il *ranking* degli interventi secondo il dispendio energetico della fase di realizzazione emerge come questo segua generalmente il trend del costo di investimento: è ragionevole pensare che un intervento estremamente costoso sia anche energeticamente dispendioso e viceversa, tuttavia alcuni interventi presentano delle inversioni di tendenza;

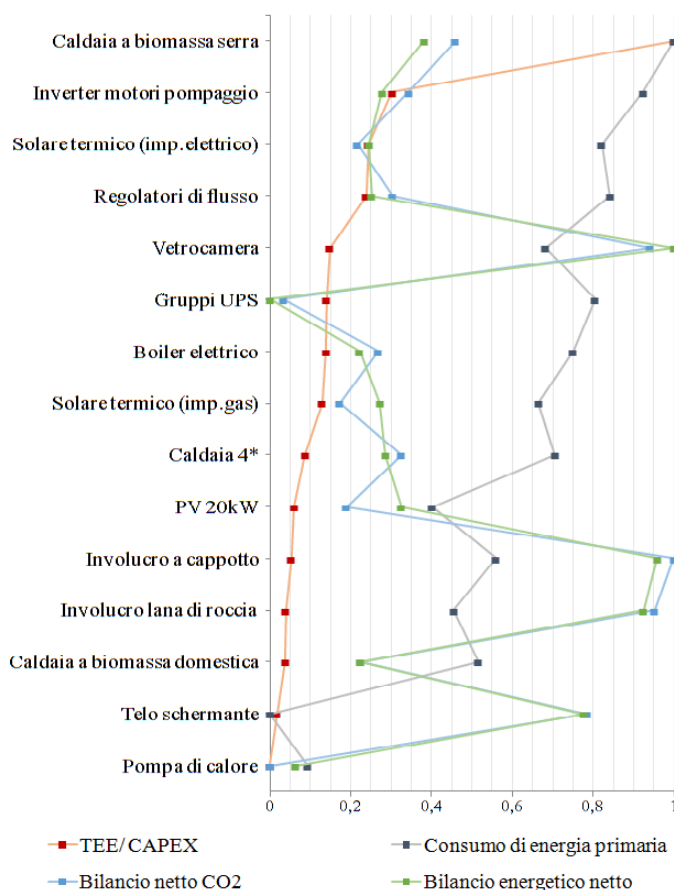


Figura 4.12 Indice normalizzato *I* degli interventi campione, secondo differenti impatti energetici e ambientali valutati.

- Interventi afferenti alla stessa scheda tecnica, come le due tipologie di rifacimento di involucro edilizio (ST 6T a,b), ma realizzati in modo differente risultano simili da un punto di vista economico, mentre un criterio di scelta energetico porterebbe a scegliere molto più decisamente per il rivestimento a cappotto;
- Valutando il saldo energetico netto conseguito dal paese a fine vita utile, emerge un *ranking* fortemente differente dagli altri tre criteri di scelta. Nonostante le forti ipotesi condotte per calcolare la proiezione dei risparmi negli anni, questo scostamento può dimostrare l'importanza di una valutazione di ciclo di vita in questo ambito. Infatti l'installazione di gruppi di continuità UPS (ST 36E), caratterizzato da una vita utile di soli 10 anni, genera complessivamente il minor risparmio energetico per il paese tra i progetti analizzati, mentre un criterio di scelta basato sull'incidenza dell'incentivo rispetto al costo dell'investimento lo porta ad essere tra interventi più favorevoli;
- Valutando l'indice *I* sulla base del bilancio netto di CO₂ si ottengono risultati analoghi a quelli emersi per il bilancio netto di energia primaria. Si riscontrano alcune differenze relativamente agli interventi che hanno un elevato impatto in termini di CO₂ nella fase di realizzazione, riscontrabile anche nella Figura 4.6. Nonostante gli obiettivi internazionali in materia ambientale siano focalizzati sulla riduzione delle emissioni di CO₂, una valutazione questo tipo è attualmente poco incentivata dal quadro normativo italiano ed i soggetti obbligati potrebbero incorrere nella scelta di progetti ad elevato impatto ambientale;
- Pur non essendo riportato in Figura 4.12, un analogo discorso può essere condotto sulle emissioni acidificanti ed il consumo di acqua della fase di realizzazione dell'intervento e valutati grazie all'approccio LCA.;
- Dai 15 interventi analizzati non è possibile notare un *ranking* univoco per gli interventi valutati nell'approccio LCA, bensì un trend di massima in cui i singoli interventi presentano dei picchi per alcuni impatti. Nella prospettiva di minimizzare tali picchi negativi può inserirsi la possibilità di utilizzare il modello *Input - Output* ibrido all'interno di un approccio di pianificazione.

Conclusioni

Sulla base dei risultati prodotti, l'approccio LCA applicato allo studio dell'efficienza energetica ha fornito un contributo all'attuale metodologia di valutazione per i seguenti motivi:

- E' stata utilizzata una metodologia consolidata in letteratura - l'*analisi IOA* - in modo innovativo, adattandola al contesto dell'efficienza energetica in Italia;
- E' stato applicato il modello proposto con successo a molteplici interventi di efficientamento energetico, inventariati dallo schema dei *Certificati Bianchi*, ottenendo risultati interessanti.

Attraverso l'adattamento e l'applicazione del modello *Input - Output ibrido mondiale* sono stati raggiunti gli obiettivi prefissati:

- Introducendo la fase di realizzazione dell'intervento di efficientamento energetico, ne è stato valutato l'impatto ambientale e sociale in termini di consumo di combustibili fossili, emissioni di inquinanti generate, consumo di acqua e manodopera richiesta;
- E' stato valutato il reale impatto ambientale evitato annualmente dal paese in ottica LCA, a partire da un'unità funzionale stabilita in accordo con lo schema normativo italiano;
- E' stato stimato l'impatto ambientale netto al termine della vita utile dell'intervento, la quale si compone di due fasi fondamentali del ciclo di vita: la fase di realizzazione e la fase operativa.

In quest'ultima definizione risiede la maggiore differenza con la metodologia esistente. In accordo con la normativa italiana dei *Certificati Bianchi* l'aggettivo "*netto*" sta ad indicare un miglioramento di efficienza rispetto ad un riferimento tecnologico o di mercato, mentre attraverso l'approccio LCA la qualità di "*netto*" indica l'aver considerato nel bilancio energetico complessivo l'energia primaria richiesta per realizzare l'intervento.

I risultati ottenuti da un punto di vista energetico per gli interventi analizzati si discostano in maniera più o meno marcata dalla quantificazione del risparmio secondo la metodologia corrente: è confortante che l'LCA proposto, pur presentando alcune differenze di metodo, non fornisca risultati in netto contrasto rispetto alla tecnica ufficialmente riconosciuta da anni.

Analizzando gli impatti ambientali specifici dei settori economici italiani, è possibile comprendere quali attività siano più dispendiose in termini energetici o ambientali, valorizzando il contesto economico in cui il progetto è collocato. Gli interventi di efficientamento che necessitano maggiormente di tali attività per essere implementati registrano un elevato impatto ambientale in fase di realizzazione, che andrà a penalizzare il bilancio netto di cui beneficia il paese al termine della vita utile.

E' emerso, infatti, come la realizzazione di impianti fotovoltaici (ST 7T) generi un elevato impatto ambientale, che incide sul bilancio ambientale netto al termine della vita utile. Da un punto di vista energetico, il bilancio netto della ST 7T è simile a quello calcolato da interventi

quali, ad esempio, l'installazione di caldaie a biomassa per il riscaldamento serricolo o di caldaie domestiche ad alta efficienza, sebbene la normativa attribuisca agli impianti PV una vita utile di 5 anni superiore ai due interventi citati.

Valutando la fase di realizzazione degli interventi attraverso le categorie d'impatto proposte, può risultare un *PayBack Time* ambientale superiore alla vita tecnica. Ad esempio, l'installazione di pompe di calore per la produzione di ACS comporta un'elevata generazione di emissioni acidificanti in fase di realizzazione ed un *PBT* superiore ai 15 anni della vita tecnica.

Per interventi afferenti alla stessa Scheda Tecnica, come il rivestimento dell'involucro edilizio (ST 6T), ma realizzati con modalità diverse, i bilanci energetici netti si differenziano di oltre 1 *ktep*, che corrisponde a circa un anno di risparmio energetico valutato in ottica LCA.

Nel corso delle analisi LCA agli interventi di efficientamento energetico, sono emersi i seguenti punti di forza del modello computazionale adottato:

- La possibilità di valutare contestualmente molteplici indicatori di impatto ambientale;
- La possibilità di affiancare ad essi anche impatti di natura sociale, seppur non comunemente inclusi nelle valutazioni ambientali di beni e servizi;
- La possibilità di applicare l'analisi a ogni tipo di progetto di efficientamento energetico.

L'ultimo punto dimostra l'elasticità del modello proposto, consentendo l'analisi LCA anche su interventi valutabili a consuntivo. Tuttavia è necessario conoscere con sufficiente dettaglio i costi di investimento sostenuti dal proponente ed il risparmio annuale generato secondo le metodologie correnti. Non sempre queste informazioni sono pubbliche o determinabili con precisione dall'analista, soprattutto in ambito industriale e per grandi progetti.

Pertanto i limiti pratici dell'approccio presentato sono:

- La stima dettagliata del costo di investimento;
- La necessità di un costante aggiornamento dei database economici ed ambientali di riferimento, per avere un quadro in tempo quasi reale della struttura economica della nazione considerata;
- L'incidenza crescente delle fonti rinnovabili sul sistema energetico nazionale. Le attività economiche, infatti, sono sostenute da consumi energetici provenienti da combustibili fossili e rinnovabili. Tanto più queste diventano incidenti, tanto più la IOA tende a perdere di precisione e sottostimare il consumo specifico di risorse fossili dei settori economici.

Ordinando gli interventi analizzati nel caso studio secondo criteri di scelta differenti, non emerge un *ranking* univoco. Ciò significa che, sulla base di impatti ambientali diversi, il paese può beneficiare maggiormente di un progetto o di un altro. Pertanto, viene visto come un possibile sviluppo della presente ricerca l'approccio di pianificazione in cui il legislatore - il GSE o gli enti locali - si trova a dover scegliere una combinazione di interventi di efficientamento energetico differenti a seconda degli indicatori d'impatto ambientale che si vogliono favorire e dei *trade off* tra di essi.

Nomenclatura

Notazione adottata

a	scalare
$\mathbf{A}(n \times m)$	vettore, n righe e m colonne
$\mathbf{i}(n \times m)$	vettore di unitario, n righe e m colonne
$\mathbf{0}(n \times m)$	vettore nullo, n righe e m colonne
$\hat{\mathbf{A}}$	matrice diagonale
$\mathbf{A}^T$	matrice traposta
$\mathbf{A}^{-1}$	matrice inversa

Simboli

UFR	Unità Fisica di Riferimento [<i>unità</i>]
RL	Risparmio Lordo [<i>tep/anno</i>]
RNI	Risparmio Netto Integrato [<i>tep/anno</i>]
$RNIa$	Risparmio Netto Integrato anticipato [<i>tep/anno</i>]
$RNIc$	Risparmio Netto Integrato contestuale [<i>tep/anno</i>]
RSL	Risparmio Specifico Lordo [<i>tep/UFR/anno</i>]
τ	coefficiente di durabilità
α	coefficiente di addizionalità
δ	tasso di decadimento di prestazione
E_{ACS}	energia per acqua calda sanitaria [<i>tep/UFR/anno</i>]
Q	energia per il riscaldamento [<i>kWh/UFR/anno</i>]
K	trasmissanza termica [$W/m^2/K$]
$r_i, \mathbf{R}$	risorse esogene richieste dal processo i
$w_i, \mathbf{W}$	flussi di scarto uscenti dal processo i
$f_i, \mathbf{f}$	domanda finale del processo i
$x_i, \mathbf{x}$	produzione totale del processo i
$e_i, \mathbf{e}$	impatto ambientale specifico del processo i
$E_i, \mathbf{E}$	impatto ambientale totale della produzione del processo i
$a, \mathbf{A}$	coefficienti tecnici, matrice dei coefficienti tecnici
$b, \mathbf{B}$	coefficienti degli input, matrice dei coefficienti degli input
$\mathbf{L}$	matrice inversa di Leontief
$\mathbf{E}_{NS}, \mathbf{E}_{SN}$	matrici di <i>Upstream Cutoff</i> e <i>Downstream Cutoff</i>
$\mathbf{Z}$	matrice delle transazioni
$\mathbf{N}$	nazione
$\mathbf{S}$	sistema disaggregato
η	rendimento
PCI	Potere Calorifico Inferiore [J/kg]
EF	emission factor [kg/J]
$\varepsilon(x)$	errore relativo [%]

$\Delta(x)$ incertezza assoluta

Pedici

i processo *i-esimo*
j processo *j-esimo*
end endogena
energy emissioni relative alla combustione
E settore *Electricity, Gas and Water Supply*
env ambiente naturale
env-soc accounting ambientali e sociali
fuel combustibili fossili
H-WIOT sistema mondiale ibrido
H sistema ibrido
N nazione
S sistema disaggregato
ITA economia italiana
k tipologia di impatto energetico, ambientale o sociale
m tipologia di risorsa primaria
n settori dell'economia nazionale
non-energy emissioni non relative alla combustione
p tipologia di impatto ambientale o sociale
q destinazioni della domanda finale
trade scambi commerciali
WIOT sistema mondiale
Y economie mondiali

Acronimi

ACS Acqua Calda Sanitaria
AEEGSI Autorità per l'Energia Elettrica, il Gas e il Sistema Idrico
ATEM Ambito TErritoriale Minimo
CAPEX Capital Expenditure
CENED Catasto Energetico degli Edifici
CGE Computable General Equilibrium
COP Conference Of Parties
DM Decreto Ministeriale
D.Lgs Decreto Legislativo
E3 Energy, Economy, Environment
EEN Efficienza Energetica
ENEA Ente per le Nuove tecnologie l'Energia e l'Ambiente
ESCo Energy Service Company
EU-ETS European Union - Emission Trading System

<i>FIRE</i>	Federazione Italiana per l'uso Razionale dell'Energia
<i>GDP</i>	Gross Domestic Product
<i>GNP</i>	Gross National Production
<i>GSE</i>	Gestore dei Servizi Energetici
<i>H-WIOT</i>	Hybrid World Input - Output Table
<i>HIOT</i>	Hybrid Input - Output Table
<i>IEA</i>	International Energy Agency
<i>IOA</i>	Input - Output Analysis
<i>IPCC</i>	Intergovernmental Panel on Climate Change
<i>ISIC</i>	International Standard Industrial Classification of all economic activities
<i>ISO</i>	International Organization of Standardization
<i>ISPRA</i>	Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale
<i>ISTAT</i>	Istituto Statistico Italiano
<i>LCA</i>	Life Cycle Assessment
<i>LCI</i>	Life Cycle Inventory
<i>LCIA</i>	Life Cycle Impact Analysis
<i>LCM</i>	Leontief Cost Model
<i>LP</i>	Linear Programming
<i>LPM</i>	Leontief Production Model
<i>MIOT</i>	Monetary Input - Output Table
<i>MiSE</i>	Ministero dello Sviluppo Economico
<i>MOLP</i>	Multiple Objective Linear Programming
<i>NACE</i>	Statistical Classification of Economic Activities in the European Community
<i>NAMEA</i>	National Accounts Matrix including Environmental Accounts
<i>OPEX</i>	Operating Expense
<i>PAN</i>	Piano d'Azione Nazionale
<i>PBT</i>	PayBack Time
<i>PIOT</i>	Physical Input - Output Table
<i>PPPM</i>	Proposta di Progetto e Programma di Misura
<i>RSE</i>	Ricerca sul Sistema Elettrico
<i>RVC</i>	Richiesta di Valutazione a Consuntivo
<i>SDA</i>	Structural Decomposition Analysis
<i>SEAs</i>	Socio - Economic Accounts
<i>SEN</i>	Strategia Energetica Nazionale
<i>SNA</i>	Standards of National Accounts
<i>ST-A</i>	Scheda Tecnica Analitica
<i>ST-S</i>	Scheda Tecnica Standard
<i>TEE</i>	Titolo di Efficienza Energetica
<i>TFC</i>	Total Final Consumption
<i>TPES</i>	Total Primary Energy Supply
<i>UE</i>	Unione Europea
<i>USD</i>	Unites States Dollar
<i>WIOD</i>	World Input - Output Database
<i>WIOT</i>	World Input - Output Table

Riferimenti

- [1] Peet J. The Origins of Ecological Economics: The Bioeconomics of Georgescu-Roegen. vol. 42. 2002. doi:10.1016/S0921-8009(02)00129-5.
- [2] IEA. World Energy Outlook 2015. Paris: 2015.
- [3] IEA. Energy Balances 2010. <http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/report/?year=2010&country=ITALY&product=Balances>.
- [4] United Nations. The World Population Prospects. 2015.
- [5] Rocco M V. Primary exergy cost of goods and services: an Input - Output approach. Politecnico di Milano, 2014.
- [6] IEA. IEA Energy Balances 2013 2013. <http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/report/?year=2013&country=EU28&product=Balances>.
- [7] Marabelli F. La filiera dell'efficienza energetica: il ruolo delle Energy Service Companies in Italia. Politecnico di Milano, 2014.
- [8] UNFCCC. List of Annex I Parties to the Convention 1997. http://unfccc.int/parties_and_observers/parties/annex_i/items/2774.php.
- [9] UNFCCC. Conference of the Parties. Twenty-first session. 2015.
- [10] European Commission. Action Plan for Energy Efficiency (2007-12). 2006.
- [11] European Parliament. Pacchetto clima-energia, obiettivo: 20/20/20. 2008.
- [12] IEA. Energy Efficiency Market Report 2015. 2015.
- [13] IEA. Member countries 2015. <http://www.iea.org/countries/membercountries/>.
- [14] Transue M, Felder FA. Comparison of energy efficiency incentive programs: Rebates and white certificates. Util Policy 2010;18:103–11. doi:10.1016/j.jup.2009.12.003.
- [15] Bertoldi P, Labanca N, Rezessy S, Steuwer S, Oikonomou V. Where to place the saving

- obligation: Energy end-users or suppliers? *Energy Policy* 2013;63:328–37. doi:10.1016/j.enpol.2013.07.134.
- [16] European Environment Agency. Achieving energy efficiency through behaviour change: what does it take? Luxembourg: 2013.
 - [17] De Chicchis L. Analisi della convenienza economica dei principali interventi di efficientamento energetico. Università degli Studi di Roma, 2014.
 - [18] Bertoldi P, Rezessy S, Lees E, Baudry P, Jeandel A, Labanca N. Energy supplier obligations and white certificate schemes: Comparative analysis of experiences in the European Union. *Energy Policy* 2010;38:1455–69. doi:10.1016/j.enpol.2009.11.027.
 - [19] MiSE. Decreto Ministeriale 20/05/2015. Italia: 2015.
 - [20] MiSE. Strategia Energetica Nazionale: per un'energia più competitiva e sostenibile. Italia: 2013.
 - [21] MiSE. Decreto Ministeriale 28/12/2012. Italia: 2012.
 - [22] Davide Valenzano. I Certificati Bianchi: stato dell'arte. 2014.
 - [23] MiSE. Piano di azione nazionale per le energie rinnovabili dell'Italia. Italia: 2010.
 - [24] www.qualenergia.it n.d. <http://www.qualenergia.it/articoli/20150929-linee-guida-tee-certificati-bianchi-parere-esco>.
 - [25] FIRE Federazione Italiana per l'uso Razionale dell'Energia. Produzione industriale efficiente: Esempi tratti dallo schema dei certificati bianchi. Rome: 2015.
 - [26] Chiaroni D, Chiesa M, Chiesa V, Franzò S, Frattini F, Toletti G. Introducing a new perspective for the economic evaluation of industrial energy efficiency technologies: An empirical analysis in Italy. *Sustain Energy Technol Assessments* 2016:1–10.
 - [27] AEEGSI. Deliberazione 27 ottobre 2011 - EEN 9/11. Italia: 2011.
 - [28] GSE. Rapporto Annuale sul meccanismo dei Certificati Bianchi. 2015.
 - [29] MiSE. Circolare 18/12/2014. Italia: 2014.
 - [30] AEEGSI. Delibera EEN 3/08. 2008.
 - [31] Governo Italiano. D. Lgs. 29/12/2006 n.311. Italia: 2006.

- [32] ENEA, ISTAT. Dati e analisi energetica del settore residenziale in Italia (1970-1998). Italia: 1998.
- [33] Rebitzer G, Ekvall T, Frischknecht R, Hunkeler D, Norris G, Rydberg T, et al. Life cycle assessment Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. *Environ Int* 2004;30:701–20. doi:10.1016/j.envint.2003.11.005.
- [34] Pennington DW, Potting J, Finnveden G, Lindeijer E, Jolliet O, Rydberg T, et al. Life cycle assessment Part 2: Current impact assessment practice. *Environ Int* 2004;30:721–39. doi:10.1016/j.envint.2003.12.009.
- [35] Heijungs R, Suh S. *The Computational Structure of Life Cycle Assessment*. vol. 11. 2002.
- [36] Technical Committee ISO/TC 207. ISO 14040:2006. ISO 2006:1–20. www.iso.org.
- [37] Iso. ISO 14044:2006 Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines. *Environ Manag - Life Cycle Assess - Princ Framew* 2006:46.
- [38] Finkbeiner M, Inaba A, Tan R, Christiansen K, Klüppel H-J. The New International Standards for Life Cycle Assessment: ISO 14040 and ISO 14044. *Int J Life Cycle Assess* 2006;11:80–5. doi:10.1065/lca2006.02.002.
- [39] Omodeo Vanone A, Summa D. *Analisi del ciclo di vita delle principali tecnologie di protezione superficiale dei versanti*. Politecnico di Milano, 2012.
- [40] Udo de Haes H a., Haes HAU De. Life-Cycle Assessment and the Use of Broad Indicators. *J Ind Ecol* 2006;10:5–7. doi:10.1162/jiec.2006.10.3.5.
- [41] Cappellaro F, Scalbi S. *La rete italiana LCA: Prospettive e sviluppi del Life Cycle Assessment in Italia*. 2011.
- [42] Miller RE, Blair PD. *Input-output analysis: Foundations and extensions*, second edition. 2009. doi:10.1017/CBO9780511626982.
- [43] Bullard CW, Herendeen RA. The energy cost of goods and services. *Energy Policy* 1975;3:268–78. doi:10.1016/0301-4215(75)90035-X.
- [44] Heijungs R, Sun S. The computational structure of life cycle assessment. *Int J Life Cycle Assess* 2002;7:314–314. doi:10.1007/BF02978899.
- [45] Wilting HC. *An energy perspective on economic activities*. University of Groningen, 1996.

- [46] Hendrickson CT, Lave LB, Matthews HS. Environmental Life Cycle Assessment of Goods and Services: An Input-Output Approach. 2006. doi:10.2307/302397.
- [47] Haan M De, Keuning SJ. Taking the environment into account: The NAMEA approach. *Rev Income Wealth* 1996;42:131–48. doi:10.1111/j.1475-4991.1996.tb00162.x.
- [48] Joshi S. Product Environmental Life-Cycle Assessment Using Input-Output Techniques. *J Ind Ecol* 1999;3:95–120. doi:10.1162/108819899569449.
- [49] Suh S (Ed. . Handbook of Input-Output Economics in Industrial Ecology. 2009. doi:10.1007/978-1-4020-5737-3.
- [50] Kondo Y, Nakamura S. Waste input–output linear programming model with its application to eco-efficiency analysis. *Econ Syst Res* 2005;17:393–408. doi:10.1080/09535310500283526.
- [51] Nakamura S, Kondo Y. Waste Input - Output Analysis concepts and application to Industrial Ecology. 2009.
- [52] Suh S. Handbook of Input-Output Economics in Industrial Ecology. 2009.
- [53] De Carvalho AL, Henggeler Antunes C, Freire F, Oliveira Henriques C. A multi-objective interactive approach to assess economic-energy-environment trade-offs in Brazil. *Renew Sustain Energy Rev* 2016;54:1429–42. doi:10.1016/j.rser.2015.10.064.
- [54] Oliveira C, Antunes CH. A multi-objective multi-sectoral economy-energy-environment model: Application to Portugal. *Energy* 2011;36:2856–66. doi:10.1016/j.energy.2011.02.028.
- [55] Hoekstra R, van den Bergh JCJM. Constructing physical input-output tables for environmental modeling and accounting: Framework and illustrations. *Ecol Econ* 2006;59:375–93. doi:10.1016/j.ecolecon.2005.11.005.
- [56] ISTAT. Le tavole delle risorse e degli impieghi e la loro trasformazione in tavole simmetriche 2006:2.
- [57] United Nation Statistics Division. The System of National Accounts (SNA) n.d. <http://unstats.un.org/unsd/nationalaccount/sna.asp>.
- [58] Galasso A, Infantino G. Analisi Input - Output: presupposti teorici e possibili applicazioni 2008:1–16.
- [59] United Nation Statistics Division. International Standard Industrial Classification of All Economic Activities (ISIC) 2008.

- [60] Eurostat. NACE Rev.2. Statistical classification of economic activities in the European Community 2008.
- [61] ISTAT. Tavola simmetrica branca per branca, Italia 2010 2010.
- [62] WIOD. Input - Output Table industry by industry, Russia 2010 2010.
- [63] Wiedmann T, Lenzen M, Turner K, Barrett J. Examining the global environmental impact of regional consumption activities–Part 2: Review of input-output models for the assessment of environmental impacts embodied in trade. *Ecol Econ* 2007;61:15–26.
- [64] Tukker A, Poliakov E, Heijungs R, Hawkins T, Neuwahl F, Rueda-Cantuche JM, et al. Towards a global multi-regional environmentally extended input-output database. *Ecol Econ* 2009;68:1928–37. doi:10.1016/j.ecolecon.2008.11.010.
- [65] Rocco MV, Colombo E. Evaluation of energy embodied in goods and services through Economic Input-Output analysis: comprehensive definition and application of international trade flows treatment methods 2016.
- [66] Combet E, Gherzi F, Lefevre J, Le Treut G. Construction of hybrid Input-Output tables for E3 CGE model calibration and consequences on energy policy analysis 2010.
- [67] Regione Lombardia, Infrastrutture Lombarde S.p.a. Database CENED 2016. <http://www.cened.it/opendata>.
- [68] RSE R sul SE. Energia elettrica, anatomia dei costi. 2015.
- [69] Brännlund R, Ghalwash T, Nordström J. Increased energy efficiency and the rebound effect: Effects on consumption and emissions. *Energy Econ* 2007;29:1–17. doi:10.1016/j.eneco.2005.09.003.
- [70] Greening LA, Greene DL, Difiglio C. Energy efficiency and consumption - the rebound effect - a survey. *Energy Policy* 2000;28:389–401. doi:10.1016/S0301-4215(00)00021-5.
- [71] IPCC, 2007 I. Climate Change 2007 : An Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change. vol. 446. 2007. doi:10.1256/004316502320517344.
- [72] Timmer M, Erumban A, Francois J, Genty a. The World Input-Output Database (WIOD): Contents, Sources and Methods. *WIOD Backgr ...* 2012:1–73. doi:10.1111/roie.12178.
- [73] Dietzenbacher E, Los B, Stehrer R, Timmer M, de Vries G. The Construction of World Input-Output Tables in the Wiod Project. *Econ Syst Res* 2013;25:71–98. doi:10.1080/09535314.2012.761180.

- [74] European Commission. World Input Output Database 2012. <http://www.wiod.org/database/index.htm>.
- [75] United Nations. International Standard Industrial Classification of All Economic Activities (ISIC) Rev. 3.1. Stat Pap 2002;1:307. doi:t.
- [76] Mandil C. Energy Statistics–Manual. Int Energy Agency, Paris, Fr 2005:1–196. doi:10.1787/9789264033986-en.
- [77] O'Mahony M, Timmer MP. Output, input and productivity measures at the industry level: The EU KLEMS database. Econ J 2009;119. doi:10.1111/j.1468-0297.2009.02280.x.
- [78] Erumban AA, Gouma R, Los B, Stehrer R, Temurshoev U, De Vries G. The World Input-Output Database (WIOD): Construction , Challenges and Applications. Dyn. Institutions & Markets Eur., 2011, p. 49.
- [79] AEEGSI. Indagine conoscitiva sulle determinanti della dinamica del sistema dei prezzi e delle tariffe 2008-2010. Roma: 2011.
- [80] ISPRA. Fattori di emissione di CO2 nel settore elettrico e analisi di decomposizione. 2012.
- [81] Emep/Eea. EMEP/EEA (2009), EMEP/EEA. Air pollutant emission inventory guidebook 2009. 1A2f Ii 1A4aii 1A4b Ii 1A4c Ii 1A4c Iii 1A5b Nonroad Mob Sources Mach 2009:1–72. doi:10.2800/23924.
- [82] Oikonomou V, Becchis F, Steg L, Russolillo D. Energy saving and energy efficiency concepts for policy making. Energy Policy 2009;37:4787–96. doi:10.1016/j.enpol.2009.06.035.
- [83] Di Santo D, Tomassetti G, Biele E, D'ambrosio S. White certificates in industry: the Italian experience. Rome: 2015.
- [84] Oikonomou V, Jepma C, Becchis F, Russolillo D. White Certificates for energy efficiency improvement with energy taxes: A theoretical economic model. Energy Econ 2008;30:3044–62. doi:10.1016/j.eneco.2008.04.005.