

**POLITECNICO DI MILANO**  
Scuola di Ingegneria Industriale e dell'Informazione  
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dell'Automazione



**Modello per l'Analisi e la Stima dell'Efficienza di una  
Linea di Assemblaggio**

**Relatore: Prof. Luca FERRARINI**  
**Tutor Aziendale: Ing. Corrado TOSCANI**

**Tesi di Laurea di:**  
**Daniele GERMANI, 823992**

**Anno Accademico 2014-2015**



*L'unico modo per fare un gran bel lavoro è  
amare quello che fate.  
Steve Jobs*



# Prefazione

Avere un impianto efficiente sia dal punto di vista energetico che produttivo è uno dei requisiti affinché un'azienda possa avere successo. In un momento in cui l'aspetto economico, e i costi in particolare, è particolarmente importante e gli investimenti, in un'ottica di miglioramento improntata alla crescita, sono difficilmente ottenibili, avere un impianto con un'elevata efficienza produttiva permette all'azienda di essere più competitiva sul mercato.

In questo contesto un'analisi, più o meno approfondita, al fine di individuare le principali fonti di inefficienza e limitarne l'azione è sicuramente una procedura utile, e forse indispensabile, soprattutto per le aziende che producono sistemi di produzione per le quali l'efficienza produttiva è un "elemento fondamentale" affinché i loro prodotti possano essere venduti.

Ricavare un modello matematico che possa essere utilizzato per effettuare questa analisi e ottenere così una stima dell'efficienza complessiva di un impianto, confrontando le diverse possibilità di configurazione delle unità al suo interno, prima che questo venga realizzato, è una scelta che alcune aziende stanno facendo per essere più competitive sul mercato.

L'obiettivo di questa tesi è quello di realizzare uno strumento di simulazione che, già in fase di progettazione, possa essere utilizzato per effettuare una prima stima dell'efficienza di un impianto attraverso un'interfaccia semplice da utilizzare e che non richieda particolari conoscenze da parte dell'utilizzatore.



# Ringraziamenti

Anzitutto devo ringraziare la mia famiglia che mi ha permesso di giungere al termine del mio percorso di studi senza farmi mai mancare il sostegno di cui ho avuto bisogno.

Ringrazio gli amici che sono sempre stati pronti a gioire per i risultati raggiunti e a distrarmi nei momenti di difficoltà.

Un ringraziamento speciale ad Anna che mi ha pazientemente sopportato e supportato durante le lunghe sessioni di esami, incoraggiandomi a non mollare quando sembrava una soluzione possibile; mi ha ascoltato quando ho avuto bisogno di sfogarmi e ha festeggiato con me i traguardi raggiunti.

Ringrazio i colleghi e compagni di corso con i quali ho condiviso questi anni al Politecnico.

Un grazie va anche a Corrado, Enos e tutti i colleghi dell'ufficio Engineering della Marsilli, dove ho svolto un periodo di stage, per avermi dato da possibilità di vivere questa esperienza in azienda facendomi sentire parte integrante dell'ufficio.

At the end I want say thanks you to all the friends who shared with me the Eastbourne English School experience during the 2014 summer.

Da ultimo ringrazio tutti coloro che vorranno festeggiare con me il raggiungimento di questo importante traguardo.



# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
1.1	Analisi del Problema . . . . .	1
1.2	Obiettivo . . . . .	3
1.3	Struttura della Tesi . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Gli Impianti di Assemblaggio</b>	<b>7</b>
2.1	L'azienda di Riferimento . . . . .	8
2.2	Mercato e Prodotti . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Analisi dell'Efficienza</b>	<b>15</b>
3.1	Overall Equipment Efficiency . . . . .	15
3.1.1	Disponibilità . . . . .	19
3.1.2	Prestazioni . . . . .	21
3.1.3	Qualità . . . . .	22
3.2	Teoria dell'Affidabilità . . . . .	23
3.2.1	Guasto e Tasso di Guasto . . . . .	25
3.2.2	Manutenzione . . . . .	30
3.3	Reliability Block Diagram . . . . .	33
3.3.1	Sistemi in Serie . . . . .	34
3.3.2	Sistemi in Parallelo o Ridondanti . . . . .	35
3.4	Buffer . . . . .	40
<b>4</b>	<b>Il Modello</b>	<b>45</b>
4.1	La Costruzione del Modello . . . . .	45
4.1.1	Gli Indici di Efficienza . . . . .	49
4.2	Applicazione a Linee Reali . . . . .	57
4.2.1	Linea A . . . . .	58
4.2.2	Linea B . . . . .	64

4.2.3	Linea C . . . . .	68
4.3	Utilizzo Inverso . . . . .	71
<b>5</b>	<b>Simulazioni</b>	<b>75</b>
5.1	Confronto Tra Diverse Configurazioni . . . . .	75
5.1.1	Inserimento di Guasti Casuali e Ritardi degli Operatori	78
5.2	Simulazione Manutenzione . . . . .	82
<b>6</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>85</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>89</b>
	<b>Sitografia</b>	<b>91</b>

# Elenco delle figure

2.1	La sede di Marsilli S.p.a. di Casetelleone (Cr) . . . . .	7
2.2	La Storia dell'Azienda . . . . .	8
2.3	Presenza della Marsilli nel Mondo . . . . .	9
2.4	Tecnologie per gli avvolgimenti . . . . .	10
2.5	Tipi di Motori Prodotti . . . . .	10
2.6	Tecnologie per lo sviluppo di Motori . . . . .	11
2.7	Sistemi di Connessione Filo . . . . .	11
2.8	Sistemi di Assemblaggio . . . . .	11
2.9	Esempio di un Sistema Completo . . . . .	12
3.1	Principali Perdite di Efficienza. . . . .	17
3.2	Comportamento di un Componente Riparabile . . . . .	20
3.3	MTBF . . . . .	20
3.4	Andamento delle funzioni di Affidabilità $R(t)$ e di Inaffidabilità $F(t)$ . . . . .	25
3.5	Tasso di Guasto $\lambda(t)$ . . . . .	26
3.6	Andamento tasso di Guasto . . . . .	27
3.7	Andamento della funzione $f(t)$ al variare di $\beta$ . . . . .	30
3.8	Attivazione Manutenzione Preventiva . . . . .	32
3.9	Configurazione Sistema in Serie . . . . .	34
3.10	Configurazione Sistema in Parallelo a Funzionamento Permanente . . . . .	35
3.11	Configurazione Sistema in Parallelo a Funzionamento Sequenziale . . . . .	37
3.12	Sistema composto da due unità con un buffer . . . . .	42
4.1	Report del Collaudo . . . . .	46
4.2	Analisi dei Dati di Guasto - Filtro Dati . . . . .	49
4.3	Analisi delle Cause di Generazione degli Scarti . . . . .	56

4.4	Interfaccia Grafica del Modello - Inserimento Dati . . . . .	58
4.5	Layout Linea A . . . . .	59
4.6	Rappresentazione RBD Linea A . . . . .	59
4.7	Dati di Stima degli Indici di Efficienza delle Linea A . . . . .	60
4.8	Confronto tra Risultati ottenuti dal modello e dati reali della Linea A . . . . .	62
4.9	Incremento di Disponibilità dato dall'inserimento di un Buffer della Linea A . . . . .	63
4.10	Layout Linea B . . . . .	64
4.11	Rappresentazione RBD della Linea B . . . . .	65
4.12	Dati di Stima degli Indici di Efficienza della Linea B . . . . .	67
4.13	Confronto tra Risultati ottenuti dal modello e dati reali della Linea B . . . . .	67
4.14	Incremento di Disponibilità dato dall'inserimento di un Buffer della Linea B . . . . .	68
4.15	Layout Linea C . . . . .	69
4.16	Rappresentazione RBD della Linea C . . . . .	70
4.17	Miglioramento OEE . . . . .	72
5.1	Interfaccia Grafica - Simulazioni . . . . .	76
5.2	Dimensionamento e Posizionamento Buffer . . . . .	78
5.3	Simulazione di Rottura Fili e Ritardi Casuali . . . . .	78
5.4	Simulazione Efficienza della Produzione Settimanale - Dati . . . . .	80
5.5	Simulazione Efficienza della Produzione Settimanale - Andamento Indici . . . . .	81
5.6	Simulazione più realistica dell'Efficienza della Produzione Settimanale - Andamento Indici . . . . .	81
5.7	Simulazione più realistica dell'Efficienza della Produzione Settimanale - Interfaccia . . . . .	82
5.8	Manutenzione Condizionata - Fault Based . . . . .	83
5.9	Manutenzione Condizionata - Life Based . . . . .	83
6.1	Simulazione Produzione . . . . .	87

# Elenco delle tabelle

3.1	Valori Target OEE . . . . .	18
3.2	Configurazione Sistema con due componenti in parallelo a funzionamento permanente . . . . .	36
4.1	Fattore tipo di Carico $f$ . . . . .	48
4.2	Stima Efficienza in Fase di Collaudo (utilizzando tutti i dati a disposizione) . . . . .	61
4.3	Stima Efficienza in Fase di Collaudo della Linea A (utilizzando solo i dati di collaudo) . . . . .	61
4.4	Stima Efficienza in Fase di Vita Utile della Linea A (utilizzan- do solo i dati di collaudo) . . . . .	61
4.5	Stima Efficienza in Fase di Vita Utile della Linea A (utilizzan- do solo i dati di vita dei componenti) . . . . .	62
4.6	Stima Efficienza in Fase di Vita Utile della Linea A (utilizzan- do tutti i dati a disposizione) . . . . .	62
4.7	Incremento di Disponibilità dato dall'inserimento di un Buffer della Linea A . . . . .	63
4.8	Dati di Collaudo Unità Bobinatura Linea B . . . . .	65
4.9	Dati di Collaudo Unità Saldatura Linea B . . . . .	66
4.10	Disponibilità Unità Saldatura Linea B . . . . .	66
4.11	Incremento di Disponibilità dato dall'inserimento di un Buffer della Linea B . . . . .	68
4.12	Indici di Efficienza Parziali e Totali della Linea C . . . . .	71
5.1	Confronto Efficienza tra diverse configurazioni Linea B . . . . .	77
5.2	Confronto Produttività tra diverse configurazioni Linea B . . . . .	77
5.3	Efficienza Considerando Ritardi e Guasti della Linea B . . . . .	79



# Acronimi

**OEE** = Overall Equipment Efficiency  
**RBD** = Reliability Block Diagramm  
**MTBF** = Mean Time Between Failure  
**MTTR** = Mean Time To Repair  
**TQM** = Total Quality Management  
**RTB** = Run To Breakdown  
**PM** = Preventive Maintenance  
**CBM** = Condition Based Maintenance



# Capitolo 1

## Introduzione

La presente Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria dell'Automazione si configura come il rapporto finale di un'attività di tirocinio curricolare svoltasi presso l'azienda Marsilli S.p.a di Castelleone (Cr). Durante questo periodo è stato sviluppato un modello in grado di stimare l'efficienza produttiva degli impianti realizzati dall'azienda, al fine di fornire uno strumento utile, in fase di progettazione, per ricavare i livelli di efficienza raggiungibili dall'impianto prima che questo venga realizzato.

### 1.1 Analisi del Problema

Nel settore industriale l'efficienza di un impianto è un requisito fondamentale per garantire un'adeguata produttività all'azienda e, proprio per questo motivo, è oggetto di un'attenta analisi che mira ad ottenerne valori attendibili e rappresentativi della realtà.

Un'analisi di questo tipo può essere impiegata sia in un'ottica di miglioramento di sistemi già esistenti, dove, attraverso una ricerca delle criticità dei componenti si vanno ad individuare le modifiche necessarie a migliorarne il funzionamento, sia in un ottica di progettazione, dove, attraverso lo studio delle lavorazioni richieste dal particolare tipo di prodotto si va a individuare la miglior configurazione possibile che permette di ridurre i costi e, allo stesso tempo, raggiungere una produttività elevata. Avere un impianto efficiente significa poi poter essere più competitivi sul mercato e garantire una maggior sicurezza agli operatori che vi lavorano.

Naturalmente esistono diverse tipologie di impianti di produzione, ognuna

## 1.1. Analisi del Problema

---

delle quali avrà bisogno di un'analisi di efficienza che vada a considerarne le caratteristiche ed evidenziarne le criticità. Una di queste tipologie fa riferimento ai sistemi, o impianti, di assemblaggio e prende in considerazione sia le aziende che utilizzano impianti per l'assemblaggio di prodotti, sia le aziende che realizzano i sistemi stessi che saranno poi impiegati per la produzione. Proprio per questa seconda categoria di aziende, la conoscenza dell'efficienza dei propri impianti è di fondamentale importanza perché determina il successo che queste possono avere in un mercato molto competitivo. Qui l'analisi dell'efficienza ha obiettivi molto diversi a seconda della fase di produzione in cui viene effettuata: da una parte, considerando un sistema già esistente, serve a garantire che i requisiti di tempi e produttività imposti dal cliente vengano rispettati; dall'altra, in fase di progettazione, serve a trovare la miglior configurazione possibile tra tipo di lavorazione, numero di macchine e livello di automazione che deve presentare l'impianto una volta realizzato per poter garantire un livello di efficienza consono alle aspettative del mercato. In questo secondo obiettivo dell'analisi viene anche considerato il problema della realizzazione di un layout di impianto che vada ad ottimizzare la produzione e non amplifichi le criticità che sono presenti.

Avere un impianto efficiente significa, poi, ridurre al minimo i tempi di fermo per operazioni di manutenzione, set-up o configurazione delle unità programmando in modo attento i momenti in cui andare ad effettuare queste operazioni. Significa anche evitare, o limitare le conseguenze, dei guasti, individuando le cause e prevedendo, quando possibile, l'istante in cui si possano verificare. Inoltre permette di eliminare, o ridurre al minimo, la produzione di scarti (prodotti che non possono essere venduti perché non conformi allo standard richiesto) attraverso un'adeguata progettazione dei controlli, un'attenta fase di montaggio delle macchine ed una precisa gestione dei tempi di ciclo, che deve sempre considerare lo stato<sup>1</sup> in cui i prodotti subiscono le lavorazioni .

---

<sup>1</sup>Un parametro importante da tenere presente in questa situazione è ad esempio la temperatura a cui si trovano i prodotti e quella raggiungibile durante e dopo la lavorazione

## 1.2 Obiettivo

In questa tesi viene proposto un modello matematico attraverso cui effettuare un'analisi dell'efficienza complessiva di un impianto e simularne la produttività per un determinato periodo di tempo. In particolare l'obiettivo del modello è fornire, non solo uno strumento utile per effettuare la stima dell'efficienza, ma che permetta di ricavare tutta una serie di indici attraverso i quali sarà possibile ottenere il valore complessivo dell'OEE dell'impianto.

Attraverso il modello si vogliono ricavare i valori degli indici di *Disponibilità*, *Prestazioni*, *Qualità* e *Affidabilità* attraverso un'analisi dei guasti e dei tempi ciclo delle unità che compongono l'impianto. Si vuole poter confrontare i valori di efficienza ottenibili da diverse configurazioni delle unità presenti nell'impianto e poter ipotizzare il dimensionamento di alcune parti meccaniche a partire dai valori di efficienza che si vogliono raggiungere. Non ultima la possibilità di effettuare simulazioni del funzionamento ordinario, con l'inserimento di guasti casuali alle diverse unità e ritardi degli operatori, e di impostare un possibile piano di manutenzione sulla base dei dati di guasti e vita utile dei componenti. Tutto questo attraverso un'interfaccia semplice e che non richieda particolari conoscenze di programmazione per essere utilizzata.

Il Modello è stato realizzato attraverso il software Microsoft Excel di proprietà della Microsoft, che risulta comodo perché permette una buona gestione e organizzazione dei dati ed è già utilizzato dalla maggioranza dei dipendenti dell'azienda. Vista la necessità di andare ad eseguire delle simulazioni, che hanno bisogno di un grande passaggio di dati, sono state scritte delle funzioni in codice VBA<sup>2</sup> ed inserite all'interno di macro eseguibili direttamente dal file Excel.

---

<sup>2</sup>Utilizzando il linguaggio di programmazione Visual Basic adattato per operare nell'ambiente Excel

## 1.3 Struttura della Tesi

La tesi si compone di cinque capitoli:

- Nel Capitolo 2 vengono introdotti gli impianti che sono stati utilizzati per la costruzione del modello. In particolare viene presa in considerazione l'azienda *Marsilli&Co S.p.a* introducendone brevemente la storia e l'organizzazione. Viene posta poi maggiore attenzione al tipo di prodotti che realizza e al mercato a cui fa riferimento;
- Nel capitolo 3, *Teoria dell'Efficienza*, si entra in merito alla teoria che sta alla base della realizzazione del modello, andando a definirne i componenti principali quali: l'*OEE*, *Disponibilità*, *Affidabilità*, *Prestazioni* e *Qualità* entrando nel dettaglio della *Teoria dell'Affidabilità* e del concetto di *Guasto*. Verrà poi introdotto il metodo *RBD* attraverso il quale si sono definite le relazioni tra le diverse unità del sistema. Prima di concludere il capitolo saranno descritte le condizioni, le modalità e le conseguenze dell'inserimento di un *Buffer* all'interno delle linee;
- Il Capitolo 4 è interamente dedicato allo sviluppo del *modello*. Nella prima parte, partendo dalla teoria definita in precedenza, verranno descritte tutte le componenti di cui è costituito, entrando nel dettaglio del calcolo degli indici e dei metodi attraverso i quali si è giunti a definirli. La seconda parte vedrà l'applicazione del modello a tre diversi tipi di *Linea di Assemblaggio* realizzate dall'azienda e la successiva analisi dei risultati ottenuti. Da ultimo si vedrà come è possibile impostare il problema dell'utilizzo inverso del modello attraverso cui poter ricavare dei parametri per il dimensionamento meccanico dei componenti, necessario al raggiungimento di specifici valori di efficienza;
- Nel capitolo 5, denominato *Simulazioni*, verranno presi in considerazione e confrontati i risultati ottenuti dalle diverse simulazioni eseguite, attraverso il modello, sulle linee analizzate nel capitolo precedente. In particolare verranno messe a confronto configurazioni diverse della stessa linea con la possibilità di inserimento di un buffer di dimensioni e in posizioni diverse. Verranno, poi, analizzate le conseguenze di guasti casuali alle unità e ritardi degli operatori sull'efficienza complessiva

della linea. Successivamente si andranno ad ipotizzare possibili piani di manutenzione.

- Nell'ultimo capitolo verranno riassunte le *Conclusioni* a cui si è giunti e proposti possibili sviluppi futuri per affrontare il tema dell'analisi e la stima dell'efficienza dei sistemi di assemblaggio, riferendosi in modo particolare all'azienda Marsilli&Co.



## Capitolo 2

# Gli Impianti di Assemblaggio

*In questo capitolo si entrerà nel merito della tipologia di impianti attraverso i quali si è potuto realizzare il modello. In particolare verrà presentata l'azienda Marsilli dove è stato sviluppato il progetto che è oggetto di questa tesi. Nella prima parte verrà introdotta la storia, la struttura e l'organizzazione dell'azienda. Successivamente si entrerà nel dettaglio degli impianti e del mercato a cui fa riferimento.*

*Con questo capitolo si definisce in modo più chiaro il contesto in cui questa tesi si inserisce e il tipo di impianti a cui è stato applicato.*



Figura 2.1: La sede Marsilli S.p.a. di Caselleone (Cr)

## 2.1 L'azienda di Riferimento

La Marsilli è stata fondata nel 1938 come azienda produttrice di macchine per l'avvolgimento fili “stand-alone” e già a partire dal 1970 ha iniziato un processo di innovazione che ha portato all'introduzione dei primi processi semiautomatici. A partire da quell'anno inizia anche lo sviluppo di processi automatici per l'avvolgimento del filo sui terminali.



Figura 2.2: La Storia

Tra la fine degli anni '90 e il 2000, per rispondere alle richieste del mercato, l'azienda incrementa lo sviluppo di sistemi automatici per la produzione di sistemi di avvolgimento fino a farli diventare lo standard di produzione. Grazie ad una politica votata allo sviluppo tecnologico e ad un continuo miglioramento, la Marsilli, si afferma nel mercato di sistemi automatici per l'assemblaggio di bobine e motori elettrici. Questo l'ha portata oggi ad essere considerata uno dei leader, a livello mondiale, nella produzione di questo tipo di sistemi.

L'azienda oggi si è affermata, non solo nella produzione di sistemi automatici per l'avvolgimento fili, ma progetta e sviluppa complessi sistemi di assemblaggio per la produzione di motori.

L'affermazione dell'azienda sul mercato a livello globale ha fatto sì che oggi sia presente, non solo in Italia, ma anche in Germania, Francia, Regno Unito, Russia, Stati Uniti, Sud America, India e Cina<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup>La produzione viene svolta prevalentemente in Italia, mentre le altre sedi sono “utilizzate” per la vendita e l'assistenza



Figura 2.3: Le sedi di Marsilli

La sede italiana di Castelleone (Cr), dove è stato svolto il tirocinio, è la sede principale di Marsilli. Qui vengono svolte tutte le operazioni che portano alla realizzazione dei sistemi: partendo dallo studio del problema, alla progettazione delle specifiche unità che le diverse lavorazioni richiedono, fino alla realizzazione di tutte le unità che sono necessarie a soddisfare le richieste dei clienti. Vista la varietà di sistemi progettati dall'azienda, è presente anche un laboratorio che permette di testare le macchine prima che queste vengano effettivamente inserite nel sistema di assemblaggio. La fase di test è di particolare importanza soprattutto per le "unità speciali", che vanno ad effettuare operazioni critiche, e per le nuove unità. Questo tipo di soluzione non rappresenta però l'eccezione; infatti le differenti richieste dei clienti impongono all'azienda il continuo sviluppo di nuove macchine e nuove tecniche in grado di effettuare tutte le operazioni necessarie.

In officina vengono poi assemblati e collaudati tutti i sistemi progettati. L'elevata precisione nelle lavorazioni richiede all'azienda l'impiego di strumenti particolari che vengono realizzati dalla MPF, un'azienda che realizza utensili meccanici e che fa parte del gruppo Marsilli.

## 2.2 Mercato e Prodotti

Si è già ampiamente introdotto che l'oggetto della produzione di Marsilli è la realizzazione di sistemi automatizzati per l'assemblaggio. Entrando ora nel dettaglio di questi sistemi è possibile vedere come essi comprendano una

## 2.2. Mercato e Prodotti

---

grande varietà di lavorazioni tra cui: operazioni di saldatura, di taglio, di piegatura, di pressatura, di smussatura e di inserimento di componenti elettronici, oltre che ovviamente operazioni per l'avvolgimento. Diventare leader di mercato nei settori di: *Coil Winding* (avvolgimenti), *Motor Winding* (avvolgimento del motore), *Wire Connection* (connessione tra i fili) e *Assembly Processes* (sistemi di assemblaggio) ha richiesto all'azienda una profonda competenza tecnologica e un continuo sviluppo di nuove unità.

Entrando nel dettaglio dei sistemi realizzati si può definire che il range di dimensione dei fili utilizzati negli avvolgimenti va da 0,02 a 2,5 mm e che le unità di bobintura sfruttano tecnologie multi-mandrino i multi-flyer.



Figura 2.4: Tecnologie per la realizzazione di Avvolgimenti

Marsilli produce avvolgitori per poli singoli, poli concatenati o statori chiusi per una grande varietà di motori sfruttando le tecnologie riportate in Figura 2.6.

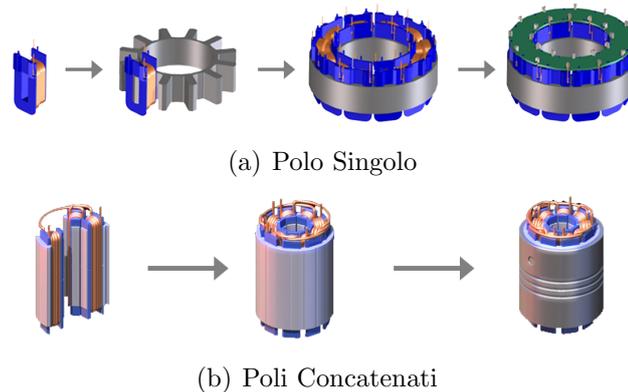


Figura 2.5: Tipi di Motori Prodotti



Figura 2.6: Tecnologie per lo sviluppo di Motori

Per quanto riguarda il settore del Wire Connection vengono impiegate diverse tecnologie e implementate in unità completamente<sup>2</sup> sviluppate in azienda.

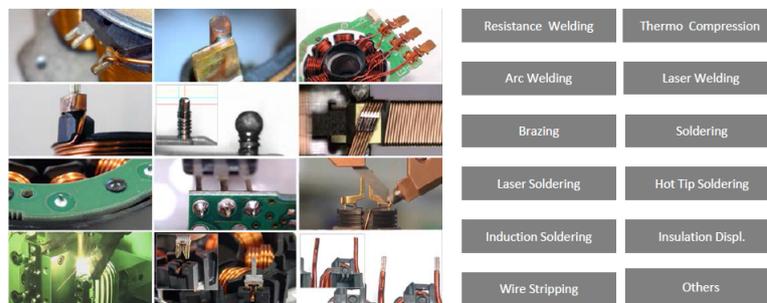


Figura 2.7: Sistemi di Connessione Filo

Queste ed altre unità vanno a comporre la gamma dei complessi sistemi di assemblaggio che l'azienda produce per rispondere alle diverse richieste dei clienti.



Figura 2.8: Sistemi di Assemblaggio

<sup>2</sup>ad eccezioni di casi molto particolari o precise richieste del cliente

## 2.2. Mercato e Prodotti

---

La produzione di Marsilli è rivolta alle aziende produttrici di componenti avvolti che richiedono precisione, velocità, affidabilità, e controllo del processo durante il ciclo di produzione. I mercati principali sono quelli dell'Automotive, dove è richiesta una competenza specifica che garantisca il totale controllo del processi per assicurarne la piena tracciabilità<sup>3</sup>, degli elettrodomestici, incentrato su una nuova generazione di motori brushless ad alta efficienza e sul miglioramento verso tecnologie più “intelligenti” ed ecologiche, delle applicazioni elettroniche, per le quali fornisce un range di macchine “stand-alone” e sistemi di assemblaggio per prodotti che variano dai piccoli sensori a teleruttori completi, e dell'RFID<sup>4</sup>, utilizzata oggi, ad esempio, per il controllo degli accessi, l'etichettatura, i pagamenti e l'identificazione di animali, ma anche nelle telecomunicazioni e molti altri.



Figura 2.9: Esempio di un Sistema Completo

Vengono ora introdotte, molto in generale, le caratteristiche delle linee di assemblaggio prodotte dall'azienda per definire in modo più chiaro quelli che sono gli impianti utilizzati nella realizzazione del modello

Una linea di assemblaggio, sia nel caso di realizzazione di semplici bobine che di statori, si costituisce da più o meno 15 unità di diversa natura.

---

<sup>3</sup>Questo mercato si sta rapidamente avviando verso le applicazioni ad alte prestazioni, non solo per i veicoli elettrici o ibridi, e questo diventerà fondamentale nei prossimi anni

<sup>4</sup>L'identificazione a radiofrequenza si classifica tra le principale 10 tecnologie del futuro

A seconda poi del prodotto per il quale sono pensate sono presenti unità di lavorazione diverse:

- nelle linee che assemblano bobine le operazioni principali sono: l'avvolgimento del filo, il taglio del filo che eccede, la saldatura o stagnatura, la piegatura dei contatti, la spellatura di eventuali fili in guaina e tutta una serie di test dimensionali ed elettrici;
- nelle linee per l'assemblaggio di statori complete, oltre alle operazioni già descritte sono presenti unità di centratura, inserimento, smussatura e pressatura.

Naturalmente, per entrambe le tipologie, vengono inserite anche unità di caricamento tramite vibratori, unità che effettuano operazioni di pick-and-place, unità di marcatura dei prodotti finiti oltre che a sistemi di movimentazione attraverso nastri, shuttle o pallet di diverso genere.

Ognuna delle operazioni sopra elencata viene poi solitamente personalizzata a seconda dello specifico tipo di prodotto che si vuole realizzare.

Nel Capitolo 4 verranno presentate più nel dettaglio le tre tipologie di impianti che sono state considerate nella realizzazione del modello durante il periodo di stage.



# Capitolo 3

## Analisi dell'Efficienza

*In questo capitolo verrà presa in considerazione la teoria che è alla base del calcolo dell'efficienza nell'ambiente industriale. In particolare si tratteranno i vari indici di efficienza necessari per ricavarne il valore dell'OEE. Si entrerà nel merito della teoria dell'affidabilità introducendo i concetti di guasto e tasso di guasto utili per ricavare poi i valori di Disponibilità e Affidabilità e impostare un piano per la Manutenzione. Verrà poi definito il metodo RBD che permette la rappresentazione e la conseguente analisi delle connessioni tra le diverse unità che costituiscono la linea. Da ultimo verrà introdotta la possibilità di inserimento di un Buffer e se ne analizzeranno le conseguenze.*

### 3.1 Overall Equipment Efficiency

Uno dei criteri più utilizzati oggi nell'ambiente industriale per l'analisi dell'efficienza è sicuramente l'OEE <sup>1</sup>.

Prima di entrare nel dettaglio dell'analisi di questo indice è necessario introdurre il concetto di *capacità produttiva* ossia la quantità di output che un singolo processo può generare in una determinata unità di tempo. Pur tenendo conto delle difficoltà nella misurazione, questa capacità è soggetta a delle perdite che non sempre consentono di ottenere nella pratica quanto auspicato dalla teoria. Alcune di queste perdite sono prevedibili come la necessità

---

<sup>1</sup>Overall Equipment Efficiency viene sviluppato da Seiichi Nakajima nel 1988 per verificare quanto efficientemente lavorasse un sistema di produzione. Molto utilizzato nei progetti di miglioramento dell'efficienza aziendale ispirato alla Lean Manufactory [De Toni, Panizzolo e Villa, 2003]

### 3.1. Overall Equipment Efficiency

---

di un set-up della macchina, la necessità di effettuare delle manutenzioni o ancora l'approvvigionamento delle materie prime; altre invece sono casuali e imprevedibili come i guasti macchina, i ritardi o assenza degli operatori o problemi qualitativi di vario genere.

L'OEE, letteralmente "efficienza generale dell'impianto", è un indicatore percentuale che rappresenta il rendimento globale di una risorsa, o di un insieme di risorse, siano esse umane o tecniche, durante il tempo nel quale sono disponibili per produrre [1].

Come è ovvio presupporre, anche la misura dell'efficienza è soggetta a diverse tipi di perdite che possono essere classificate, molto in generale, in tre diverse categorie:

- **DownTime**: perdite di tempo dovute a guasti o eventi, prevedibili e non, che richiedono di fermare l'impianto o parte di esso;
- **Speed Losses**: perdite di tempo dovute a microfermate o riduzioni di velocità;
- **Quality Losses**: perdite di produttività dovute alla scarsa qualità dei prodotti finiti imputabile a diversi fattori tra cui: la scarsa qualità delle materie prime, l'interruzione di una lavorazione dovuta ad un guasto o ad errori durante la produzione.

Ogni categoria va ad influenzare un aspetto differente dell'efficienza. In particolare le perdite chiamate Downtime riducono il tempo in cui la risorsa è disponibile per operare, quelle definite Speed Losses influenzano il ritmo medio di produzione andando a ridurre la velocità di attraversamento del ciclo produttivo e, infine, le perdite di tipo Quality Losses vanno a ridurre il numero di prodotti finiti conformi allo standard richiesto dal mercato e quindi a generare scarti.

Dovendo integrare tutti questi aspetti e, allo stesso tempo, tenerli separati così che possano essere considerati e analizzati in modo indipendente si fa corrispondere ognuno di essi ad un diverso indice di efficienza e rispettivamente all'indice di **Disponibilità**  $A^2$ , all'indice di **Prestazioni**  $Rv$  e all'indice di **Qualità**  $Rq$ . L'OEE viene poi calcolato come:

$$OEE = A \cdot Rv \cdot Rq \quad (3.1)$$

---

<sup>2</sup>A dall'inglese Availability

Per meglio comprenderne i significati è utile andare a definire tutti i tipi di perdite come riduzione del tempo utile per la buona produzione. In questo modo si potrà avere una visione più completa e generale del problema del calcolo dell'efficienza [§1].

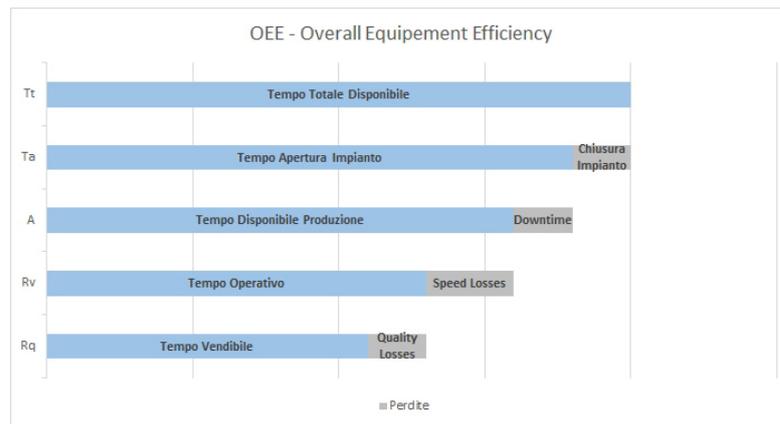


Figura 3.1: Principali Perdite di Efficienza.

In Figura 3.1 è mostrato come il tempo disponibile per la buona produzione<sup>3</sup> sia effettivamente ridotto rispetto a quello che, teoricamente, si avrebbe a disposizione. Rispetto a quanto già detto in precedenza è possibile notare un'ulteriore riduzione iniziale del tempo disponibile in quanto l'impianto potrebbe non poter produrre semplicemente perché l'azienda è chiusa. Una volta ottenuto il tempo realmente disponibile per la produzione, al netto delle chiusure a calendario, è possibile calcolare l'efficienza complessiva come il rapporto tra il tempo di buona produzione e il tempo totale che si ha a disposizione.

<sup>3</sup>produzione vendibile

### 3.1. Overall Equipment Efficiency

---

Entrando ora nel dettaglio dei singoli indici di efficienza che costituiscono l'OEE, tenendo presente i diversi tipi di perdita mostrati in Figura 3.1, possiamo definire:

- Disponibilità come il rapporto effettivo tra il tempo in cui si potrebbe produrre e il tempo reale di produzione al netto delle perdite di Downtime
- Prestazioni come il rapporto tra il tempo di produzione delle quantità totali realizzate, rispetto alle perdite per Speed Losses, e quello ideale.
- Qualità come il rapporto di tempo tra la produzione di pezzi buoni, conformi agli standard richiesti, e la produzione totale. Gli scarti possono essere causati da diversi fattori, annoverati tra le perdite per Quality Losses.

A livello industriale esistono dei valori target per ognuno degli indici che vanno a comporre l'OEE diversificati a seconda del settore di appartenenza. Nella Tabella 3.1 sono riportati alcuni esempi [2].

Settore	Disponibilità	Prestazioni	Qualità	OEE
Manifatturiero	>90%	>95%	> 99.9%	60% < OEE < 85%
Processo				70% < OEE < 90%
Metallurgico				65% < OEE < 70%
Cartario				70% < OEE < 95%

Tabella 3.1: Valori Target OEE nei diversi settori Industriali.

Ogni azienda avrà poi dei valori target che si propone di raggiungere e mantenere che possono essere imposti dal mercato in cui è inserita o dallo standard ideale per lo specifico prodotto.

L'utilizzo dell'indice OEE non si riduce soltanto al calcolo dell'efficienza complessiva di una linea o di un impianto, ma può anche essere utilizzato per l'analisi delle singole unità nella ricerca di *bottlenecks* o in un'ottica improntata al miglioramento dell'efficienza dei singoli componenti (andando a migliorare così anche l'efficienza complessiva).

Dopo aver introdotto il significato e l'utilizzo dell'indice OEE entriamo ora nel dettaglio delle sue componenti così da approfondirne i significati e definirne i metodo di calcolo.

### 3.1.1 Disponibilità

Con il termine Disponibilità si definisce la percentuale di tempo in cui i componenti possono produrre al netto delle indisponibilità del componente stesso. Il valore di questo indice si calcola come rapporto tra il tempo di produzione e il tempo di apertura dell'impianto<sup>4</sup>.

$$A = \frac{\text{Tempo di Produzione}}{\text{Tempo di Apertura Impianto}} = \frac{UpTime}{UpTime + DownTime} \quad (3.2)$$

Dove *UpTime* fa riferimento al tempo di effettiva produzione, mentre *DownTime* fa riferimento alla somma dei tempi in cui il componente, o l'impianto, non è disponibile per le ragioni che si sono prima elencate. Tuttavia questa definizione non risulta comoda per un'analisi dettagliata della disponibilità, soprattutto se si volesse estenderla all'insieme di più componenti. A tal proposito vengono introdotti i parametri **MTBF** (Mean Time Between Faliure) e **MTTR**(Mean Time To Repair) grazie ai quali è possibile definire questo indice di efficienza come:

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (3.3)$$

Il parametro MTBF rappresenta il tempo medio di buon funzionamento che intercorre tra due fermate successive, qualora un sistema possa essere considerato riparabile<sup>5</sup>. Il suo valore viene calcolato considerando l'istante iniziale, dopo ogni riparazione, come se fosse il primo istante di funzionamento, in altre parole si considera il componente come se fosse nuovo dopo ogni riparazione ( in caso di componenti non riparabili il tempo è cumulativo) come mostrato in Figura 3.3.

---

<sup>4</sup>tempo in cui l'impianto o il componente potrebbe produrre

<sup>5</sup>Un sistema è considerato riparabile se l'avvenire di un guasto non richiede la completa sostituzione del componente. Un sistema è considerato non riparabile quando i suoi componenti non possono essere riparati

### 3.1. Overall Equipment Efficiency

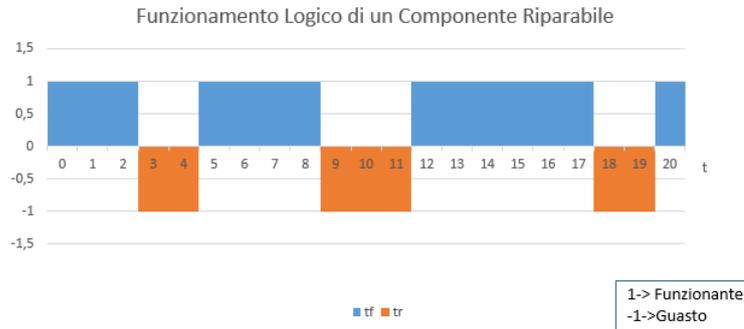


Figura 3.2: Comportamento di un componente riparabile

La figura mostra il diagramma di funzionamento di un componente riparabile in cui  $t_r$  rappresenta i tempi in cui il componente è in riparazione  $t_f$  i tempi in cui il componente è funzionante.

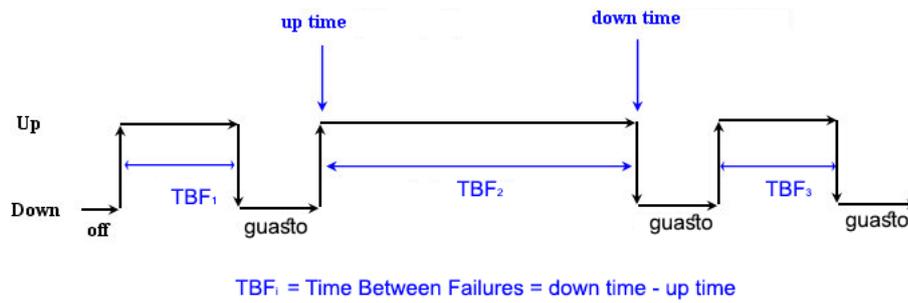


Figura 3.3: MTBF - Mean Time To Failure

Il parametro MTTR rappresenta invece il valore medio della durata delle operazioni di riparazione che permettono ad un componente fermo o guasto di riprendere la sua funzione e si calcola come rapporto tra il tempo totale in cui il componente è fermo e il numero di fermate che effettua, sempre in riferimento alla durata del periodo che si sta considerando.

$$MTBF = \frac{T_{rif} - T_{stop}}{N_{stop}} \quad (3.4)$$

$$MTTR = \frac{T_{stop}}{N_{stop}} \quad (3.5)$$

Dove  $T_{rif}$  indica il tempo di riferimento per il quale si vuole ricavare la disponibilità,  $T_{stop}$  indica il tempo totale in cui il componente è fermo al-

l'interno del periodo di riferimento e  $N_{stop}$  indica il numero di fermate del componente.

Definiti in questo modo il valore di questi parametri risulta strettamente legato alla durata del periodo di riferimento che l'analisi tiene in considerazione. Vedremo nella sezione 3.2 come questo possa essere evitato per avere dei valori molto più generali e quindi utilizzabili anche per effettuare delle previsioni.

### 3.1.2 Prestazioni

Con il termine Prestazioni si definisce il rapporto percentuale tra il ritmo di produzione reale, al netto delle microfermate, e il ritmo teorico di produzione previsto. Il valore di questo indice può essere ricavato dal prodotto di due parametri: la percentuale di utilizzo del componente e il rapporto tra i ritmi di produzione reale e teorico.

Il parametro di utilizzo (U) si calcola come rapporto tra il tempo effettivo di lavorazione e il tempo teoricamente disponibile<sup>6</sup>. Le indisponibilità di cui tiene conto questo parametro non conducono necessariamente ad una fermata, ma possono semplicemente determinare una diminuzione della velocità di produzione.

Il rapporto tra i ritmi di produzione considera i cambi di ritmo dovuti alle microfermate ed è strettamente collegato ad U. Spesso questa componente viene trascurata in quanto le variazioni di ritmo produttivo sono trascurabili rispetto al valore della percentuale di utilizzo. Risulta essere invece particolarmente importante qualora si volessero confrontare diverse configurazioni di un impianto in cui varia il numero di componenti per la stessa unità. In questo caso, infatti, l'aggiunta o la rimozioni di componenti andrebbe ad influenzare in maniera importante il ritmo produttivo ottenibile.

$$Rv = \frac{\text{Produzione Reale}}{\text{Produzione Teorica}} = \frac{Q_{buona} + Q_{scarti}}{Tp_{netto} \cdot \frac{1}{Tc_{idle}}} = U \cdot \frac{Tc_{idle}}{Tc_{real}} \quad (3.6)$$

Dove  $Q_{buona}$  si riferisce al numero di prodotti buoni,  $Q_{scarti}$  si riferisce al numero di prodotti scartati perchè non conformi,  $Tp_{netto}$  si riferisce al Tempo di produzione netto,  $Tc_{idle}$  si riferisce tempo ciclo ideale/standard e  $Tc_{real}$  si

---

<sup>6</sup>Corrisponde a tutti gli effetti ad una disponibilità, ma i tempi di fermo che si considerano sono molto ridotti e il verificarsi di una fermata del tutto casuale

riferisce tempo ciclo reale realizzato.

#### 3.1.3 Qualità

Con il termine Qualità si fa riferimento alla percentuale di prodotti buoni rispetto al totale della produzione. Un prodotto per essere considerato buono deve soddisfare dei requisiti minimi che ne garantiscano il corretto funzionamento, nelle condizioni per le quali è stato progettato, e rispettando le specifiche sulla forma e la qualità richieste dal mercato.

$$Rq = \frac{Q_{buona}}{Q_{buona} + Q_{scarti}} = 1 - \frac{Q_{scarti}}{Q_{buona} + Q_{scarti}} \quad (3.7)$$

Dove  $Q_{buona}$  si riferisce al numero di prodotto buoni e  $Q_{scarti}$  si riferisce al numero di prodotto scartati perchè non conformi.

La produzione di scarti può avvenire per diverse cause derivante da errori di funzionamento o fornitura tra cui: una scarsa qualità delle materie prime, la brusca interruzione della lavorazione a causa di guasti e blocchi che non permette al pezzo di essere terminato, l'errore nel set-up del componente che quindi va ad effettuare operazioni che rovinano il pezzo, errori nella progettazione della lavorazione. Altre cause di formazioni degli scarti sono da ricercare nelle condizioni di lavoro dei componenti: eccessiva temperatura dovuta a surriscaldamenti della macchina o all'eccessiva velocità, eccessive vibrazioni che non consentono l'esatto posizionamento del pezzo. Altre ancora vanno ricercate direttamente sullo stato dei componenti che vanno ad effettuare le lavorazioni come l'eccessiva usura o deformazione degli utensili. D'altra parte la formazione di scarti può essere anche attribuita all'eccessivo tasso di qualità richiesto nelle unità addette ad effettuare i test sui prodotti finiti.

Quindi attribuire l'esatta causa ad ogni scarto non è un'operazione semplice, ma si vedrà in seguito come il valore di questo parametro possa essere ricavato in modo sufficientemente preciso.

## 3.2 Teoria dell’Affidabilità

La nascita della teoria dell’affidabilità risale al periodo tra la prima e la seconda guerra mondiale con la comparsa dei primi aerei a più motori per i quali si doveva decidere quale fosse configurazione migliore per il sistema di propulsione. Il concetto di affidabilità non era ancora stato definito in modo rigoroso e gli studi avevano inizialmente un carattere prettamente sperimentale così come puramente sperimentali erano anche i dati sulla frequenza di guasto delle apparecchiature di bordo. Solo nel 1930 tutti questi dati iniziarono ad essere analizzati statisticamente, fornendo utili indicazioni sui miglioramenti da apportare ai progetti. Tra il 1943 e il 1945 sia i tedeschi (Von Braun) che gli americani che operavano in ambito militare, cercarono di dare una soluzione ingegneristica ai problemi affidabilistici. Alla fine degli anni ’80 gli studi sull’affidabilità, spinti dall’aumentare della complessità dei sistemi industriali, entrarono a far parte del TQM (Total Quality Management) e alcuni metodi di valutazione dell’affidabilità dei sistemi cominciano ad essere richiesti per ottenere la certificazione di qualità ISO-9000 [3].

Lo scopo per cui è stata sviluppata la teoria dell’affidabilità è quello di valutare se un prodotto o un servizio sarà funzionante per la durata richiesta dall’utente. Tale materia di studio include un insieme di teorie, di metodi matematici e statistici e di tecniche operative impiegate per determinare cosa potrebbe non funzionare, quali strategie adottare per prevenire il guasto, e nel caso in cui il guasto si verifichi, quali siano gli interventi più adatti per ripristinare rapidamente il funzionamento e limitare le conseguenze; essa ci permette inoltre di distinguere tra sistemi riparabili e non riparabili ed analizzare sistemi a due o più stati di funzionamento.

L’analisi di affidabilità, effettuata mediante concetti e strumenti matematici e numerici di tipo probabilistico, è oggi uno strumento determinante sia in fase progettuale che in fase di collaudo e manutenzione di elementi o sistemi di qualsiasi tipo.

L’affidabilità non è una grandezza deterministica, ma una probabilità che, come una variabile aleatoria, può essere determinata con formule analitiche e il cui valore può essere previsto solo attraverso considerazioni di tipo probabilistico. Applicata in modo sistematico ad un sistema, ci dà risultati di notevole utilità sui quali è possibile basare importanti decisioni sulle moda-

lità di funzionamento dell’impianto.

La definizione più completa è quella che indica l’Affidabilità  $R^7$  di un elemento/sistema come la probabilità che esso funzioni senza guastarsi ad un dato istante e/o per un certo periodo  $t$  con riferimento a ben precisate condizioni operative e ambientali [4]. Quindi gli elementi necessari alla definizione di affidabilità sono:

- Un criterio univoco per determinare se un elemento sia funzionante o meno;
- L’esatta definizione delle condizioni ambientali e d’impiego;
- La determinazione dell’intervallo di tempo  $t$ .

La definizione di affidabilità è quindi legata alla specifica funzione che il sistema deve compiere e alle condizioni operative nel quale esso si trova. Fissate queste condizioni l’affidabilità può essere considerata come la scienza di prevedere, analizzare, prevenire e limitare i guasti nel tempo.

Una possibile formulazione, dal punto di vista matematico, definisce l’affidabilità [5] come:

$$R = R(c, a, t) \quad (3.8)$$

Dove  $c$  rappresenta lo stato del componente,  $a$  le condizioni ambientali e  $t$  il periodo di riferimento.

Le principali proprietà della funzione  $R$  sono

$$R(0) = 1 \quad (3.9)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} R(t) = 0 \quad (3.10)$$

Si può poi definire l’inaffidabilità come il complemento a uno dell’affidabilità.

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (3.11)$$

Le due funzioni  $R(t)$  e  $F(t)$  sono, dunque, funzioni di probabilità complementari, come mostrato in Figura 3.4.

Esiste, perciò, la corrispondente funzione di densità di probabilità dei guasti  $f(t)$ :

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (3.12)$$

---

<sup>7</sup>Reliability in inglese

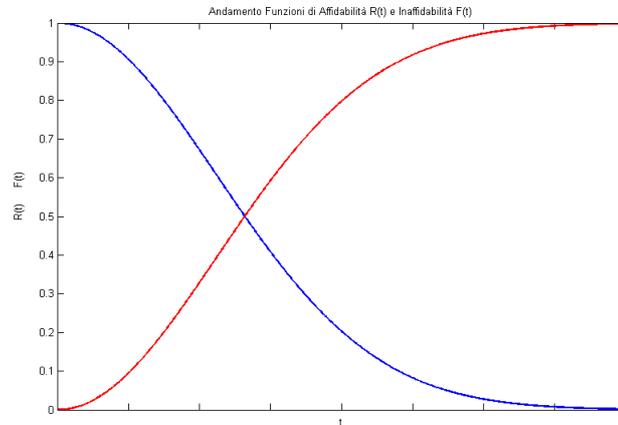


Figura 3.4: Andamento delle funzioni di Affidabilità  $R(t)$  e di Inaffidabilità  $F(t)$

ed il prodotto  $f(t) \cdot dt$  rappresenta la probabilità che il componente considerato si guasti nell’intervallo di tempo compreso tra  $t$  e  $t+dt$ .

Di fondamentale importanza, ed alla base delle definizioni sia di affidabilità che di disponibilità, è il concetto di **guasto**.

### 3.2.1 Guasto e Tasso di Guasto

In generale è possibile definire il concetto di guasto come la cessazione dell’attitudine di un dispositivo ad adempiere alla funzione richiesta, ovvero la variazione dello stato di funzionamento di una dispositivo che lo porta ad essere inutilizzabile rispetto alla funzione che gli è richiesta. In questi termini risulta che anche un dispositivo funzionante, ma che non svolge correttamente la sua funzione, possa essere classificato come guasto.

Il rateo di guasto  $\lambda(t)$ , strettamente connesso alla probabilità di guasto, è una funzione del tempo che descrive come il tasso istantaneo di guasto  $\lambda$  di ogni componente vari in funzione dell’età del componente stesso.

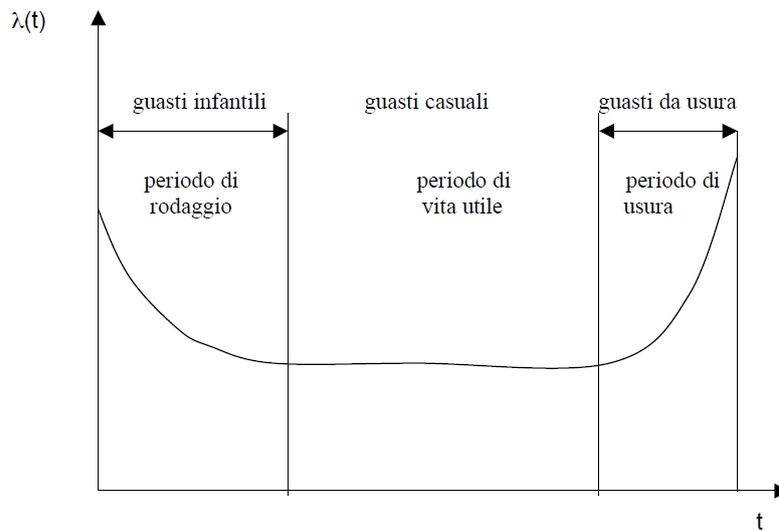


Figura 3.5: Andamento della funzione di tasso di guasto  $\lambda(t)$

L’andamento tipico di questa funzione viene riportato in Figura 3.5, in quello che è comunemente chiamato *grafico a vasca da bagno*, in cui è possibile distinguere tre diverse fasi della vita del componente dal rispettivo andamento della funzione  $\lambda(t)$ :

- 1) **Guasti Infantili:** fa riferimento alla prima fase di vita del componente, corrispondente al periodo di rodaggio. In questo periodo la funzione  $\lambda(t)$  è decrescente. La natura di questi guasti è legata ai difetti intrinseci e non emersi durante la fase di collaudo che sono essenzialmente dovuti ad errori nella fase di montaggio. La durata di questa fase varia tipicamente da qualche decina di ore ad un massimo di qualche centinaia di ore<sup>8</sup>.
- 2) **Guasti Casuali:** questa è la fase principale della vita del componente, corrispondente alla sua vita utile. In questa fase la funzione  $\lambda(t)$  può essere considerata costante in quanto i guasti sono del tutto casuali e dovuti a fattori incontrollabili e imprevedibili presenti in tutti i progetti.
- 3) **Guasti da Usura:** si riferisce al termine della vita utile del componente. La funzione  $\lambda(t)$  assume un andamento crescente dovuto al peggiorare delle condizioni dei componenti con il trascorrere del tempo a causa del presentarsi di fenomeni di usura.

<sup>8</sup>1-3 settimane, considerando un solo turno da 8 ore

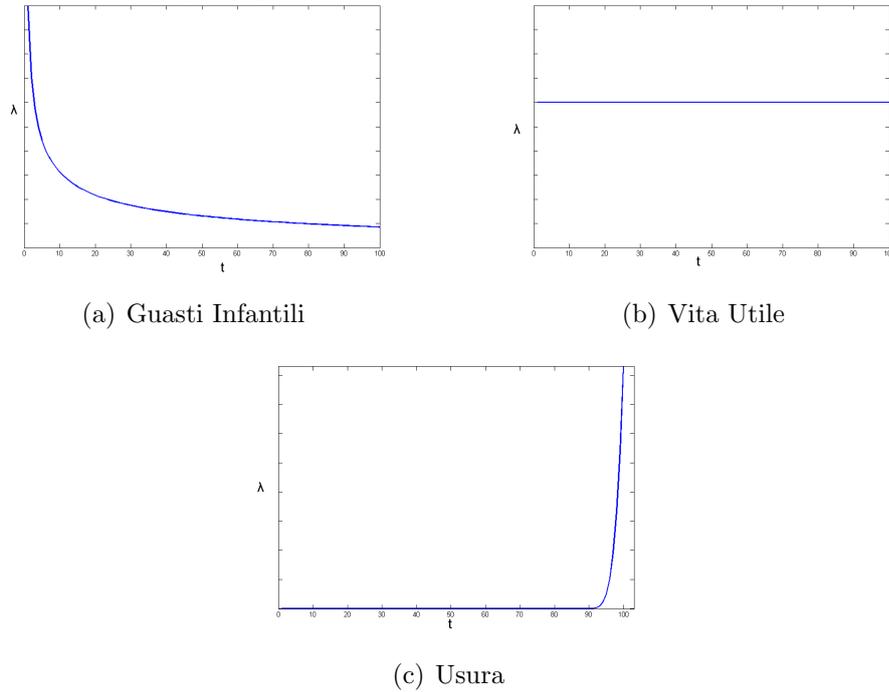


Figura 3.6: Andamento della funzione  $\lambda(t)$  nelle diverse fasi di vita del componente

Risulta ora possibile rivedere le definizioni delle funzioni che determinano la misura dell’affidabilità in funzione del tasso di guasto  $\lambda(t)$ . Anzitutto la funzione  $f(t)$ , densità di probabilità di guasto, può essere ridefinita come:

$$f(t) = \lambda(t) \cdot R(t) \quad (3.13)$$

Facendo lo stesso anche per le funzioni di Affidabilità e Inaffidabilità, si ottengono così le seguenti relazioni:

$$R(t) = \frac{f(t)}{\lambda(t)} = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (3.14)$$

$$F(t) = 1 - e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (3.15)$$

Sostituendo ora quanto ottenuto nell’equazione 3.13 si ottiene

$$f(t) = \lambda(t) \cdot e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (3.16)$$

Il passo successivo è quello di scrivere la definizione del parametro MTBF in funzione di  $\lambda$  in alternativa alla definizione dell’equazione 3.4:

$$MTBF = \int_0^\infty t \cdot f(t) dt = \int_0^\infty R(t) dt = \int_0^\infty e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} dt \quad (3.17)$$

Si è già spiegato che la funzione di rateo di guasto  $\lambda(t)$  presenta principalmente tre andamenti, corrispondenti alle tre diverse fasi di vita del componente, tuttavia esistono molte leggi che caratterizzano la funzione densità di probabilità di guasto nel tempo e quindi l’affidabilità stessa dei componenti. Vediamo brevemente i principali modelli matematici che possono essere utilizzati:

- Gaussiana (Normale):

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (3.18)$$

- Esponenziale negativa:

$$R(t) = e^{-\lambda(t)t} \quad (3.19)$$

- Lognormali:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\log(t-\mu)}{\sigma}\right)^2} \quad (3.20)$$

Oltre a quelle sopra elencate è possibile utilizzare la *distribuzione di Weibull*. La distribuzione di Weibull rappresenta uno degli strumenti più utili nello studio dell’affidabilità. Tale distribuzione, infatti, propone una valida modellazione statistica che descrive il comportamento al guasto del sistema sia durante la fase di *guasti infantili*, sia durante la fase di *vita utile*, sia durante la fase di *usura*. Riprendendo la Figura 3.5 è possibile modellizzare il periodo di vita utile assumendo che il tasso di guasto rimanga costante lungo tutto il periodo.

Si consideri quindi la funzione di probabilità:

$$F(\tau) = 1 - e^{-\int_0^\tau \lambda(t)dt} \quad (3.21)$$

Derivando l’equazione 3.21 rispetto a  $\tau$  si ottiene:

$$f(\tau) = \frac{dF(\tau)}{d\tau} = \lambda(\tau)e^{-\int_0^\tau \lambda(t)dt} \quad (3.22)$$

Definendo ora

$$\lambda(t) = \alpha \cdot t^{\beta-1} \quad (3.23)$$

che, per l’equazione 3.22, corrisponde alla densità di probabilità

$$\begin{cases} f(\tau) = \alpha \cdot \tau^{\beta-1} e^{-\frac{\alpha \cdot \tau^\beta}{\beta}} & \tau \geq 0 \\ f(\tau) = 0 & \tau < 0 \end{cases} \quad (3.24)$$

L’equazione 3.24 è nota come distribuzione di Weibull [§2].

Esistono tuttavia diverse versioni di questa distribuzione. Quella più adatta al calcolo dell’affidabilità è la funzione di Weibull a due parametri positivi  $\eta$  e  $\beta$ , indicata con  $W(\eta, \beta)$ , che costituisce una legge probabilistica che generalizza il modello esponenziale.

Per adattarla meglio ai parametri che si hanno a disposizione è più conveniente scrivere l’equazione 3.16 come:

$$f(t) = \left(\frac{\beta}{\eta}\right) \left(\frac{t - t_0}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^\beta} \quad (3.25)$$

i cui:

- $\eta$  è il fattore di scala ed è un tempo dal punto di vista dimensionale;
- $\beta$  è il fattore di forma ed è adimensionale;
- $t_0$  è il fattore di posizione.

Riprendendo poi l’equazione 3.22, si ottiene:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^\beta} \quad (3.26)$$

$$\lambda(t) = \left(\frac{\beta}{\eta}\right) \cdot \left(\frac{t - t_0}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (3.27)$$

Osservando l’espressione di  $f(t)$  nell’equazione 3.25 si capisce che, al variare del fattore di forma  $\beta$ , la funzione assume aspetti ben diversi come è possibile vedere in Figura 3.7.

In particolare possiamo distinguere i tre casi:

- $\beta < 1$  : la funzione  $\lambda(t)$  è monotona decrescente e corrisponde al periodo rappresentate i guasti infantili;
- $\beta = 1$  : la funzione  $\lambda(t)$  è costante e corrisponde al periodo rappresentate la vita utile;
- $\beta > 1$  : la funzione  $\lambda(t)$  è monotona crescente e corrisponde al periodo rappresentate l’usura;

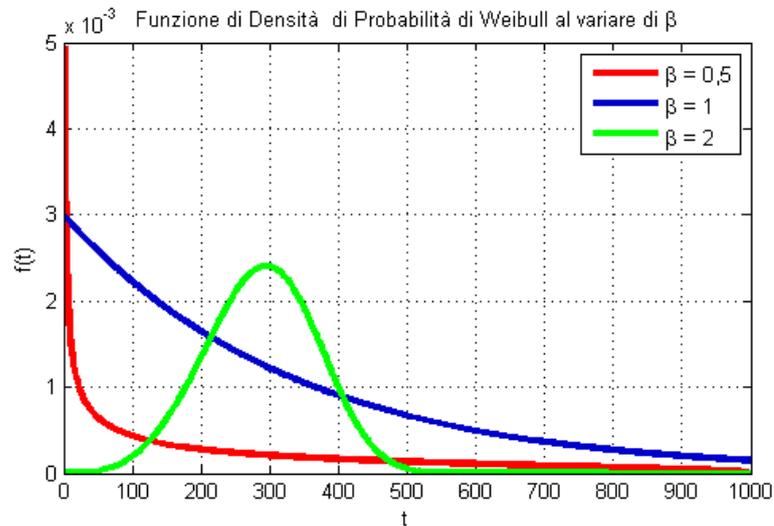


Figura 3.7: Andamento della funzione  $f(t)$  al variare di  $\beta$

Il parametro  $\eta$  si è detto essere chiamato parametro di scala o *vita caratteristica*. All’aumentare di  $\eta$  l’affidabilità mantiene valori elevati per un lungo periodo di tempo.

In conclusione, la distribuzione di Weibull, può essere applicata a componenti con tasso di guasto crescente, decrescente o costante. Questa versatilità è una delle ragioni del suo largo utilizzo negli studi di affidabilità.

### 3.2.2 Manutenzione

Si è visto che quando un componente raggiunge una certa età, il tasso di guasto cresce più rapidamente. Se si vuole ovviare a questo inconveniente, cioè riportare il tasso di guasto a valori più bassi e l’affidabilità a valori più elevati, si deve intervenire per compiere delle operazioni di **manutenzione**. La norma UNI EN 13306<sup>9</sup> definisce la manutenzione come la combinazione di tutte le azioni tecniche, amministrative e gestionali, incluse azioni di supervisione, previste durante il ciclo di vita di un’entità e destinate a mantenerla o riportarla in uno stato in cui essa possa eseguire la funzione richiesta [§3]. La manutenzione industriale è un’operazione programmata, volta a mantenere inalterata l’efficienza di un macchinario o di un impianto e a mantenerne

<sup>9</sup>versione ufficiale della norma EN 13306 (edizione aprile 2001)

costante la produttività.

I principali metodi [6] per l’attivazione della manutenzione sono:

- i) Run To Breackdown (RTB): manutenzione a guasto o correttiva;
- ii) Preventive Maintenance (PM): manutenzione preventiva;
- iii) Condition Based Maintenance (CBM) manutenzione su condizione o condizionata;

Il primo metodo permette l’attivazione della manutenzione dopo che un guasto è avvenuto e consiste in una serie di operazioni attraverso le quale il componente è riportato in condizioni di funzionare correttamente. Questo tipo di manutenzione richiede una buna preparazione del personale e un’alta disponibilità di ricambi a magazzino. Viene impiegata quando le operazioni di manutenzione sono facili da eseguire e occorrono dopo guasti non gravi e totalmente imprevedibili. Pur avendo costi relativamente bassi non è sempre vantaggiosa e, in alcuni casi, comporta un sovradimensionamento del magazzino e dei rischi per la sicurezza.

Per manutenzione preventiva si intende quell’insieme di operazioni, generalmente eseguite ad intervalli regolari di tempo, che hanno lo scopo di assicurare il previsto livello di prestazioni, affidabilità e sicurezza, prevedendo e contrastando il verificarsi di guasti.

Gli interventi di manutenzione preventiva prevedono ispezioni, controlli e revisioni totali o parziali, durante le quali si eseguono operazioni di lubrificazione, pulizia, regolazione, riparazione o sostituzione di eventuali elementi guasti e si revisionano o sostituiscono gli elementi prossimi al termine della loro vita utile.

In Figura 3.8 si può vedere come, con una manutenzione preventiva programmata all’istante  $T_p = 150$ , in cui  $R(t)=0,8$ , si riesce a mantenere un tasso di guasto pressoché costante per lunghi periodi di tempo.

Non è detto però che il ricorso alla manutenzione preventiva sia sempre vantaggioso. Se infatti si considera il caso in cui si intervenga con delle operazione previste dal piano di manutenzione durante una fase a  $\lambda$  costante, a causa di una scelta non appropriata la durata dell’intervallo  $T_p$ , non si avrebbe alcun beneficio, dal momento che l’andamento dell’affidabilità resterebbe lo stesso, ma si dovrebbe sostenere il costo per l’attivazione del servizio.

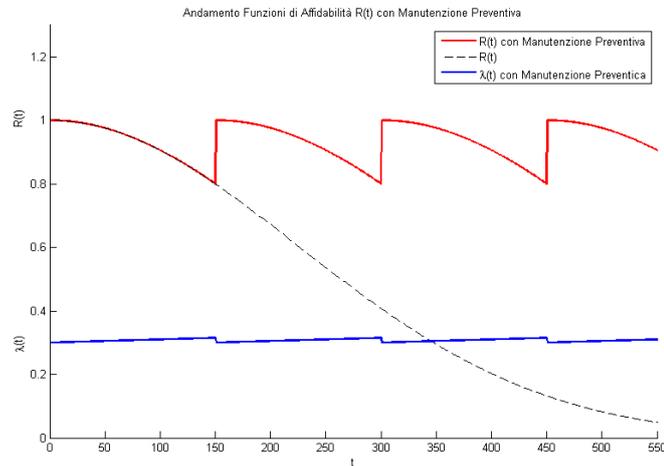


Figura 3.8: Attivazione Manutenzione Preventiva

Questo metodo di manutenzione necessita di personale competente e di conoscere la statistica del comportamento del guasto. Il si preferisce quindi impiegare quando il costo di riparazioni non previste è elevato e i guasti non sono totalmente casali.

Il terzo metodo di manutenzione (CBM), definita anche manutenzione controllata, è un miglioramento del precedente e viene impiegato quando l’attivazione di operazioni di manutenzione è costosa e non è possibile determinare con esattezza la distanza migliore tra i diversi interventi, come prevede la manutenzione preventiva. Perché questo metodo possa venire impiegato è necessaria la conoscenza e l’impiego di strumenti diagnostici, in grado di valutare l’affidabilità del sistema, identificare le unità critiche da controllare maggiormente e monitorare costantemente l’impianto.

La manutenzione controllata viene attivata quando l’affidabilità del componente, o del sistema, che si sta controllando scende al di sotto del limite minimo prefissato. In questo modo si riesce a mantenere sia un tasso di guasto non eccessivamente elevato che un livello di affidabilità adeguato.

### 3.3 Reliability Block Diagram

Un sistema è definito come un'unità costituita da più componenti, ciascuno con una sua propria identità funzionale, che concorrono al buon funzionamento e al compimento della missione del sistema stesso. Si è sottolineato come l'affidabilità dei singoli componenti venga determinata mediante studi statistici; per l'affidabilità di un sistema si ricorre a un'analisi dal punto di vista delle logiche di guasto. Si andranno quindi a individuare le relazioni che legano l'affidabilità di un sistema costituito da più elementi, integrati tra loro a causa delle diverse connessioni fisiche e logiche, all'affidabilità dei singoli componenti. Le connessioni fisiche tra gli elementi dipendono da come è strutturato il sistema, mentre le connessioni logiche si fondano sulle risposte fornite dai vari componenti nel corso delle diverse fasi operative.

Per determinare la relazione che lega l'affidabilità, e quindi l'efficienza, dei singoli componenti con l'affidabilità del sistema complessivo si ricorre a quella che è chiamata analisi di *affidabilità combinatoria*.

Indicando con  $R_s$  l'affidabilità del sistema complessivo e con  $R_i$  l'affidabilità del componente  $i$ -esimo possiamo ricavare la seguente espressione

$$R_s = f(R_i) \quad (3.28)$$

con  $i=1,2,\dots,n$ .

Tramite la funzione  $f(R_i)$  è possibile vedere l'effetto che si produce sulle caratteristiche dell'intero sistema intervenendo su uno o più elementi. Questa analisi assume ulteriore importanza perché permette l'individuazione dei punti critici del sistema che potranno essere modificati mediante la riprogettazione di alcune parti in modo da raggiungere a valori ottimali di affidabilità. Dal punto di vista affidabilistico il funzionamento di un sistema può essere raffigurato graficamente con uno o più schemi a blocchi opportunamente interconnessi, dove ogni blocco rappresenta un sottosistema o un componente. Questi schemi in generale non corrispondono con la dislocazione fisica delle singole macchine, ma servono a visualizzare la dipendenza logica che intercorre tra il guasto del sistema e il guasto di un sottosistema o componente.

Uno dei metodi più utilizzati per mostrare le relazioni tra i diversi componenti ed effettuare un'analisi di affidabilità e disponibilità sul sistema complessivo è il metodo RBD (Reliability Block Diagram).

All'interno dello schema logico, i componenti di un sistema possono assu-

mere due diverse configurazioni in relazione alla reciproca posizione logica, denominate serie e parallelo [7].

### 3.3.1 Sistemi in Serie

Consideriamo un sistema composto da  $n$  elementi in modo tale che il guasto (considerato come evento indipendente) di un qualsiasi di essi determina lo stato di guasto dell'intero sistema.

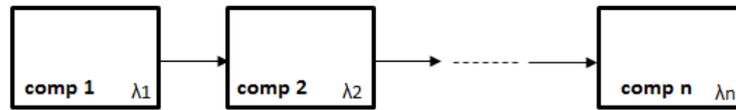


Figura 3.9: Configurazione Sistema in Serie

La probabilità che il sistema funzioni è data al prodotto delle probabilità di funzionamento di ogni sottosistema o componente<sup>10</sup>.

$$\begin{aligned}
 R_s(t) &= P(c_1, c_2, \dots, c_n) = P(c_1) \cdot P(c_2|c_1) \cdot \dots \cdot P(c_n|c_1 c_2 \dots c_{n-1}) \\
 &= R_1(t) \cdot R_2(t) \cdot \dots \cdot R_n(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) = \prod_{i=1}^n e^{-\int_0^t \lambda_i(\tau) d\tau} \quad (3.29) \\
 &= e^{-\int_0^t \sum_{i=1}^n \lambda_i(\tau) d\tau}
 \end{aligned}$$

da cui si deduce che il tasso di guasto del sistema complessivo può essere ricavato come:

$$\lambda_s(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t) \quad (3.30)$$

$$MTBF_s = \frac{1}{\lambda_s} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{MTBF_i}} \quad (3.31)$$

Siccome l'affidabilità è un valore minore di 1, l'affidabilità del sistema risulterà essere sempre minore della più piccola affidabilità dei componenti.

---

<sup>10</sup>con  $P(c_i)$  si intende la probabilità che l' $i$ -esimo componente sia funzionante nell'istante di tempo considerato

### 3.3.2 Sistemi in Parallelo o Ridondanti

I sistemi nei quali alcune funzioni vengono moltiplicate, con lo scopo di ottenere una migliore affidabilità, vengono detti ridondanti e il loro schema base è quello parallelo.

Si possono distinguere diversi tipi di funzionamento per due o più componenti posti in parallelo: sistemi in parallelo a *funzionamento permanente* e sistemi in parallelo a *funzionamento sequenziale* [8].

Prendiamo ora in considerazione un sistema a  $n$  componenti a **funzionamento permanente**. La configurazione sarà di tipo parallelo se la funzionalità è garantita anche quando sia attivo un solo componente; in altre parole il guasto (considerato come evento indipendente) si verifica solo per  $n$  elementi guasti.

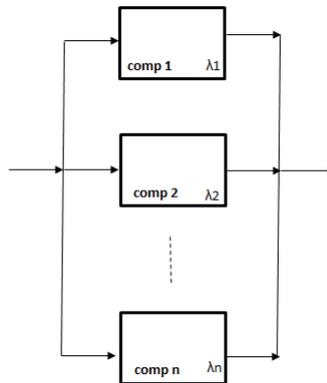


Figura 3.10: Configurazione Sistema in Parallelo a Funzionamento Permanente

Nell'ipotesi in cui il guasto di un componente sia indipendente dal guasto di un altro (eventi stocasticamente indipendenti) possiamo determinare l'affidabilità del sistema come<sup>11</sup> :

$$\begin{aligned}
 R_s(t) &= P(c_1 + c_2 + \dots + c_n) = 1 - P(\bar{c}_1) \cdot P(\bar{c}_2) \cdot \dots \cdot P(\bar{c}_n) \\
 &= 1 - \prod_{i=1}^n F_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t))
 \end{aligned} \tag{3.32}$$

<sup>11</sup>con  $P(\bar{c}_i)$  si intende la probabilità che l' $i$ -esimo componente non sia funzionante nell'istante di tempo considerato

### 3.3. Reliability Block Diagram

---

É subito evidente che all'aumentare del numeri di componenti in parallelo aumenta anche l'affidabilità complessiva del sistema.

Per semplicità si consideri ora un sistema composto da solo due componenti. In tabella 3.2 vengono riportate le possibili configurazioni per le quali il sistema è funzionante:

<i>Componente<sub>A</sub></i>	<i>Componente<sub>B</sub></i>	<b>Affidabilità del Sistema</b>
Funzionante	Funzionante	$R_A \cdot R_B$
Funzionante	NON Funzionante	$R_A \cdot (1 - R_B)$
NON Funzionante	Funzionante	$(1 - R_A) \cdot R_B$

Tabella 3.2: Configurazione Sistema con due componenti in parallelo a funzionamento permanente

Da cui è possibile determinare l'affidabilità complessiva come:

$$\begin{aligned} R_s &= R_A \cdot R_B + R_A \cdot (1 - R_B) + (1 - R_A) \cdot R_B \\ &= R_A + R_B - R_A \cdot R_B \end{aligned} \quad (3.33)$$

Del resto, come detto in precedenza, il sistema è non funzionante solo se entrambi i componenti sono non funzionanti.

Estendendo l'analisi al calcolo del parametro MTBF e del tasso di guasto si ottiene:

$$MTBF_s = MTBF_A + MTBF_B - \frac{MTBF_A \cdot MTBF_B}{MTBF_A + MTBF_B} \quad (3.34)$$

$$\lambda_s = \frac{\lambda_A^2 + \lambda_B^2 + \lambda_A \cdot \lambda_B}{\lambda_A \cdot \lambda_B + (\lambda_A \cdot \lambda_B)} \quad (3.35)$$

L'affidabilità del sistema complessivo risulterà quindi sempre maggiore dell'affidabilità di ogni singolo componente.

Si consideri ora il caso di sistemi in parallelo a **funzionamento sequenziale** (Stand-by).

In questo caso si ha che solo  $m$  elementi su  $n$  totali, con  $m < n$ , sono funzionanti in un certo istante, mentre i restanti  $(n - m)$  elementi fungono da riserva stand-by e lo schema funzionante varia nel tempo in funzione del verificarsi

di un guasto. La variazione dello schema di collegamento è determinata da un sistema di rilevazione del guasto che comanda un componente S (switch). Ancora una volta per semplicità si considera un sistema costituito da soli due componenti. In particolare sia il componente A attivo, mentre B rimane in stand-by fino al verificarsi di un guasto.

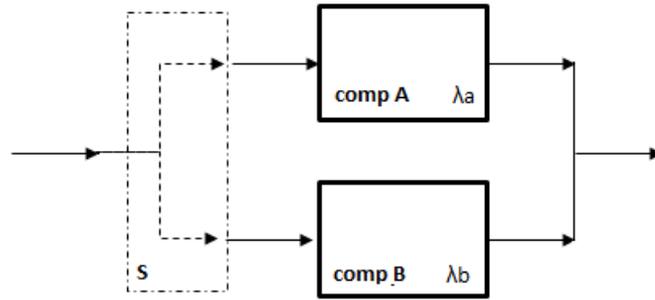


Figura 3.11: Configurazione Sistema in Parallelo a Funzionamento Sequenziale

Considerando che il sistema di rilevazione del guasto e di commutazione abbia affidabilità pari a 1. Il buon funzionamento del sistema è garantito per due casi possibili: il componente A non si guasta nell'intervallo di tempo di riferimento e quindi  $R_{s_1}(t) = R_A(t)$ , oppure il componente A si guasta all'istante  $\tau$ , con  $0 < \tau < t$ , ed entra in funzione il componente B per il periodo di tempo da  $\tau$  a  $t$ . In questo caso l'affidabilità del sistema risulterebbe:

$$R_{s_2} = \int_0^t f_A(\tau) \cdot R_B(t - \tau) d\tau \quad (3.36)$$

dove  $f_A(\tau)d\tau$  è la probabilità che il componente A si guasti in  $\tau$  e  $R_B(t - \tau)$  rappresenta la probabilità che il componente B funzioni da  $\tau$  a  $t$ .

L'affidabilità complessiva è data dall'unione delle affidabilità del sistema nei due possibili casi, risultando ovviamente maggiore in assenza di riserva di stand-by:

$$R_s = R_{s_1} + R_{s_2} = R_A(t) + \int_0^t f_A(\tau) \cdot R_B(t - \tau) d\tau \quad (3.37)$$

Sotto l'ipotesi che i due componenti abbiano il medesimo tasso di guasto, ovvero  $\lambda_A = \lambda_B = \lambda$  l'affidabilità del sistema risulta essere:

$$R_s = e^{-\lambda t} + \int_0^t \lambda \cdot e^{-\lambda \tau} \cdot e^{-\lambda(t-\tau)} d\tau = e^{-\lambda t} \cdot (1 + \lambda t) \quad (3.38)$$

### 3.3. Reliability Block Diagram

---

E ovviamente si ha che  $MTBF_s = \frac{1}{\lambda}$ .

Estendendo il calcolo al caso di n componenti

$$R_s = e^{-\lambda t} \left( 1 + \lambda t + \frac{(\lambda t)^2}{2!} + \dots + \frac{(\lambda t)^{(n-1)}}{(n-1)!} \right) \quad (3.39)$$

Rimuovendo ora l'ipotesi che i due componenti abbiano lo stesso tasso di guasto, ( $\lambda_A \neq \lambda_B$ )<sup>12</sup> l'affidabilità del sistema, espressa in funzione del tasso di guasto dei singoli componenti, risulta essere:

$$R_s(t) = e^{-\lambda_A t} \cdot \left( 1 + \frac{\lambda_A t}{\lambda_B t - \lambda_A t} \right) = \frac{e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t} \lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} \quad (3.40)$$

e il valore del parametro MTBF, sempre espresso in funzione del tasso di guasto dei singoli componenti:

$$MTBF_s = \int_0^t R_s(t) dt = \frac{\lambda_B}{\lambda_A(\lambda_B - \lambda_A)} - \frac{\lambda_A}{\lambda_B(\lambda_B - \lambda_A)} \quad (3.41)$$

L'affidabilità di un sistema con n componenti in stand-by è maggiore rispetto all'affidabilità della configurazione in parallelo a funzionamento permanente<sup>13</sup>.

Da ultimo se si rimuovesse l'ipotesi di idealità del commutatore, verrebbe introdotta un'ulteriore quantità che andrebbe ad influenzare il calcolo dell'affidabilità del sistema. Il commutatore verrebbe infatti considerato come un componente a se posto in serie al sistema e quindi si avrebbe:

$$R_{s_{complete}}(t) = R_c(t) \cdot R_s(t) \quad (3.42)$$

dove  $R_s$  corrisponde all'affidabilità calcolata nelle equazioni 3.38 ,3.39 o 3.40 a seconda del caso che a cui si vuole fare riferimento e  $R_c$  l'affidabilità del commutatore.

Spesso però, nella realtà applicativa, si presentano situazioni in cui le schematizzazioni in serie e parallelo non sono applicabili o non bastano per una corretta rappresentazione: in questo caso si deve ricorrere ad altri metodi di analisi.

---

<sup>12</sup>tornando al caso di sistema costituito da soli due componenti

<sup>13</sup>L'estensione al caso di n parametri per il parallelo a funzionamento permanente consiste nel considerare come componente il parallelo di due componenti

Le considerazioni fatte sul calcolo dell’Affidabilità per i sistemi in serie e parallelo sono valide anche per il calcolo dell’indice di *Disponibilità*

## 3.4 Buffer

I sistemi a linea di produzione o assemblaggio possono anche contenere dei buffer che fungono da “magazzini temporanei” per parti che stanno attraversando il sistema [§4]. Essi possono trovarsi sia nelle linee automatiche che in linee manuali. Nelle linee automatiche possono essere costituiti da due meccanismi: il primo che accetta parti dalle unità precedenti e il secondo che rilascia le parti per le stazioni successive<sup>14</sup> [9]. Le dimensioni e il posizionamento dei buffer sono parametri di rilevante importanza nel calcolo dell’efficienza della linea.

L’inserimento di uno o più buffer all’interno del sistema porta numerosi vantaggi quali:

- La riduzione dell’impatto di unità bloccate;
- La costituzione di un magazzino di parti supplementare;
- La possibilità di contenere gli output di parti di linea in attesa di continuare il processo di lavorazione;
- La possibilità di effettuare pause o soste per le macchine e per i pezzi prima di continuare il ciclo produttivo;
- Lo “Smussamento” delle variazioni di tempo ciclo che possono avvenire sulla linea.

Tuttavia la funzione principale di un buffer è quella di suddividere la linea in parti che possono operare indipendentemente dal diverso numero di cicli. L’obiettivo è quello di minimizzare le inefficienze dovute all’interazione reciproca tra le diverse unità, in modo particolare sulle macchine principali, andando ad accumulare alcune parti lavorate.

Esistono principalmente due modalità di accumulo [10] statica, in cui un vero buffer è posizionato tra due unità, o dinamica, in cui si sfrutta il sistema di trasporto tra le diverse unità come elemento di accumulo delle parti. Questa seconda possibilità è caratterizzata da due funzionalità del buffer chiamate: *antistarve* e *antiblock*. Un buffer di tipo *antistarve* previene che l’unità a valle del buffer rimanga in attesa di pezzi da lavorare qualora l’unità a monte

---

<sup>14</sup>Nelle linee automatizzate questi meccanismi sono solitamente sostituiti da robot che effettuano operazioni di *pick-and-place*

si fermi. Un possibile posizionamento di questo tipo di buffer è prima delle unità critiche (unità con maggiore probabilità di guasto).

Un buffer di tipo antiblock previene che l'unità che precede il buffer si blocchi dopo che l'unità a valle si è già fermata. Un possibile posizionamento di questo tipo di buffer è dopo delle unità critiche.

Oltre alla posizione e alla dimensione, un ulteriore parametro di fondamentale importanza per il corretto dimensionamento di un buffer è il numero nominale (ideale) di pezzi presenti nel buffer per assicurarne la miglior prestazione possibile. Il livello nominale per i buffer di tipo antistarve è del 90%, mentre del 50% nel caso di buffer antiblock.

L'effetto, quindi, dell'inserimento di buffer tra due unità è quello di spezzare la linea in più parti allo scopo di migliorarne l'efficienza, attraverso il miglioramento dell'indice di disponibilità<sup>15</sup>. In particolare abbiamo detto che la disponibilità di una linea è calcolata come rapporto tra il tempo in cui la linea è disponibile a produrre ed il tempo totale a disposizione, vede equazione 3.1.1.

Volendo considerare l'inserimento di un buffer l'indice di disponibilità può essere scritto come:

$$A^* = \frac{T_c}{T_p} = \frac{T_c}{T_c + F \cdot T_d} \quad (3.43)$$

Dove  $T_c$  rappresenta il tempo ciclo ideale, "tarato" sull'unità più lenta ( $T_c = MAX(T_{unita_i} + T_{trasporto})$ ),  $F$  rappresenta la frequenza/tasso di guasto e  $T_d$  il tempo di fermo [11].

Per semplicità si consideri ora un sistema composto da sole due unità, poste in serie tra loro in cui viene inserito un buffer come mostrato in Figura 3.12

L'inserimento di un buffer di dimensione  $b$  tra le due unità porta ad avere un livello di disponibilità complessiva che è definito dall'equazione:

$$A_b^* = A_0^* + D_1 \cdot h(b) \cdot A_2^* \quad (3.44)$$

---

<sup>15</sup>l'indice di efficienza che maggiormente risente dell'inserimento del buffer è sicuramente la disponibilità, visto che questa aggiunta non dovrebbe andare ad influenzare in modo altrettanto importante l'indice di prestazioni, né l'indice di qualità

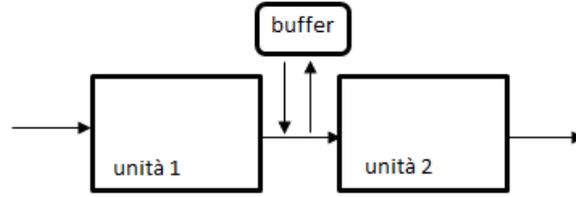


Figura 3.12: Sistema composto da due unità con un buffer

Dove  $A_0^*$  corrisponde alla disponibilità del sistema senza buffer ed è calcolata attraverso l'equazione 3.43, utilizzando i parametri di tempo ciclo, tasso di guasto e tempo totale di fermo complessivi del sistema, calcolati come descritto nel paragrafo 3.3.1,  $D_1$  è un parametro proporzionale al tempo di fermo dell'unità 1 e si calcola come:

$$D_1 = \frac{F_1 \cdot T_{d1}}{T_c + (F_1 + F_2) \cdot T_d} \quad (3.45)$$

$h(b)$  è proporzionale a  $D_1$  e rappresenta lo stato in cui l'unità 1 è ferma e l'unità 2 può essere attivata e funzionare con una capacità limite del buffer di  $b > 0$

$$\begin{aligned} h(b) &= \frac{r \cdot (1 - k^b)}{1 - r \cdot k^b} \\ r &= \frac{F_1}{F_2} \\ k &= \frac{1 + r - \frac{T_c}{T_d}}{1 + r - r \cdot \frac{T_c}{T_d}} \end{aligned} \quad (3.46)$$

$A_2^*$  rappresenta la disponibilità dell'unità 2 dopo il buffer ed è calcolata attraverso l'equazione 3.43 utilizzando i parametri di guasto dell'unità

$$A_2^* = \frac{T_c}{T_p} = \frac{T_c}{T_c + F_2 \cdot T_d} \quad (3.47)$$

Naturalmente esistono anche dei limiti entro i quali definire i parametri che costituiscono anche un range per i possibili risultati:

- L'inserimento di infiniti buffer ( con il livello nominale di riempimento) rende impossibile il blocco del sistema;
- $A_{\infty}^* = \min(A_i^*)$ . La disponibilità di un sistema avente al suo interno buffer di capacità infinita dopo ogni unità corrisponde al valore dell'unità avente la minima disponibilità;
- $A_0^* < A_b^* < A_{\infty}^*$ ;
- La massima disponibilità si raggiunge quando il numero dei buffer presenti nel sistema è uguale al numero di unità del sistema stesso;
- Maggiore è la differenza tra  $A_0^*$  e  $A_{\infty}^*$  maggiori saranno i vantaggi ottenibili dall'introduzione del buffer.

Va anche sottolineato che, l'inserimento di un buffer, ha costi non indifferenti, soprattutto nel caso in cui i pezzi, o le parti immagazzinare abbiano dimensioni e/o forme complesse. Inoltre la presenza di troppi buffer va ad influenzare anche la produttività del sistema in quanto la presenza di un elevato numero di parti ferme nei buffer, non sarebbe più trascurabile rispetto al numero totale dei pezzi e andrebbe ad aumentare la durata del ciclo produttivo.

Quindi l'inserimento di uno o più buffer deve necessariamente essere preceduto da uno studio e un'analisi accurata del sistema, per evitare che questa operazione sia inutile o peggio, vada a ad abbatterne le prestazioni di un sistema aumentandone però il costo.



# Capitolo 4

## Il Modello

*In questo capitolo verrà definito il modello impiegato per effettuare la stima dell'efficienza complessiva di un impianto. Lo sviluppo viene diviso in tre parti: nella prima parte viene presentato il metodo di calcolo utilizzato per ricavare il valore dei vari indici di efficienza fino ad ottenere un modello dei calcoli dell'OEE. Successivamente vengono considerati tre diverse linee di assemblaggio con un crescente livello di complessità, a cui verrà applicato il modello e verranno analizzati i risultati ottenuti. Nell'ultima parte viene descritta la possibilità di utilizzo inverso, ovvero come poter impostare il problema di dimensionamento meccanico dei componenti a partire dai valori di efficienza che si vogliono raggiungere.*

### 4.1 La Costruzione del Modello

Per arrivare a definire un valore di stima dell'efficienza complessiva di un impianto, attraverso l'indice OEE, il modello sfrutta diversi tipi di dato ricavabili dalle singole unità che compongono il sistema. In particolare vengono utilizzati i dati provenienti dalle prove di collaudo eseguite in azienda, i dati di vita utile dei componenti che costituiscono le unità, ricavati dai diversi datasheets, e i dati di operazioni da eseguire periodicamente sulle macchine della linea.

#### 4.1. La Costruzione del Modello

Ognuna delle tre parti fa riferimento ad un diverso tipo di dato:

- I) Analisi dei dati di guasto provenienti dalle prove di collaudo. Vengono analizzati i report prodotti dall'impianto durante la fase di collaudo. Dai dati presenti vengono estratti i valori associabili ai guasti che possono presentarsi durante il normale funzionamento. In Figura 4.1 viene presentata parte del file di report prodotto dall'impianto al termine di una prova di collaudo;

Automatic system performances:						
<b>Acquisition time</b>	Begin	16/10/15 11:03	End	16/10/15 12:32		89 Minutes
<b>Quantity</b>	(Sum of good and bad parts)	697 Pieces	Good parts	692 Pieces	Bad parts	5 Pieces
			% Reject	0,72 %		
<b>Downtime</b>	Machine stops due to lack of material or personnel			45	Seconds	
<b>Fault time</b>	Machine-dependent fault cause			775	Seconds	
<b>Worktime</b>	Acquisition time - Downtime - Fault time			4528	Seconds	
<b>Cycle time netto</b>	Measured by the PLC machine			7,61	Seconds	
<b>Real Cycle time</b>	Worktime / Pieces * 60			6,54	Seconds	
<b>Efficiency</b>	Worktime / (Acquisition time) * 100		> ? %	84,79	%*	
<b>Technical availability</b>	Worktime / (Worktime + Fault time) * 100		>97%	85,39	%*	* From downtime (> 1 min.) calculated see availability
<b>Availability</b>	Theoretical Cycle time			6,7	Seconds	
	(Real pieces quantity / Theoretical pieces quantity)			88,19	%	
	Real quantity			697		
	Theoretical quantity			790		
Detailed documentation						
1. Stops log						
Unit	Stop number	Start	End	Duration	Cause	Classification
U02	1	11:05:34	11:05:36	0:00:02	PalletManage_ChangePallet [WaitOff SQ12-04]U02_PalletManage_PalletPresent_OnBackZone	Machine
U02	2	11:07:15	11:07:18	0:00:03	PalletManage_ChangePallet [WaitOff SQ12-04]U02_PalletManage_PalletPresent_OnBackZone	Machine
U02	3	11:08:57	11:09:00	0:00:03	PalletManage_ChangePallet [WaitOff SQ12-04]U02_PalletManage_PalletPresent_OnBackZone	Machine
U03	1	11:17:25	11:20:04	0:02:39	U03_Main program [WaitOn B16-01]U03_BobbinPresent_OnSelectionDevice	Machine
U03	2	11:20:40	11:20:44	0:00:04	U03_Main program [WaitOn B16-01]U03_BobbinPresent_OnSelectionDevice	Machine
U03	3	12:31:13	12:31:51	0:00:38	PalletManage_StopPallet [WaitOn SQ14-02]U03_PalletManage_Index_Inserted	Machine
U04	1	11:38:20	12:22:00	0:43:40	PalletManage_StopPallet [WaitOn SQ22-02]U04_PalletManage_Index_Inserted	Machine
Sum of all machine-related stops		=	Number	0	Duration	0:57:53 h
Sum of all organizational stops		=	Number		Duration	h
Sum of all lack of material stops		=	Number		Duration	h
Sum of all not cataloged stops		=	Number		Duration	h
<b>Sum of all stops</b>		=	Number	<b>0</b>	Duration	<b>0:57:53 h</b>

Figura 4.1: File di Report della Prova di Collaudo

- II) Analisi dei dati provenienti dai datasheet dei singoli componenti delle macchine. Qui vengono ricercate e, se serve, calcolate le durate della vita utile dei diversi componenti. Partendo quindi dai dati presenti nelle schede tecniche di sensori, valvole, componenti elettrici o meccaniche e motori

si estraggono i parametri necessari al calcolo della durata della vita utile del componente. I dati che i produttori forniscono sono solitamente riportati sotto forma di MTBF o numero di cicli che l'elemento può sopportare. Questi dati sono poi adattati all'effettivo ritmo di utilizzo che i componenti dovranno sopportare;

III) Analisi delle fermate necessarie già note in fase di progettazione.

Da ultimo vengono considerati quei tempi di fermo che ogni unità richiede per operazioni di pulizia, impostazione o sostituzione di parti di cui si conoscono le caratteristiche e i requisiti per il buon funzionamento. Questa analisi risulta utile anche per iniziare a impostare un possibile piano di manutenzione per il sistema.

Tutti i parametri ricavati da questa prima analisi verranno poi "tarati", attraverso la distribuzione di Weibull, per poter essere impiegati nel calcolo della stima dell'efficienza.

Prima di entrare nel dettaglio del calcolo degli indici che costituiscono l'OEE è necessario fare alcune osservazioni in merito ai metodi utilizzati per ricavare il valore dei vari parametri attraverso i diversi tipi di dato a disposizione. Se per i dati relativi alle fermate imposte alle macchine, affinché possa esserne assicurato il corretto funzionamento, non servono particolari sottolineature, i dati ottenuti dalle prove di collaudo e dai datasheet richiedono un'analisi più approfondita per garantire l'attendibilità dei valori di efficienza che verranno ottenuti.

Per ricavare il valore finale dei parametri dai dati relativi al collaudo vengono prese in considerazione diverse prove e, attraverso l'analisi delle cause di fermo ed i relativi tempi di ripartenza, si estraggono le principali cause di guasto. Questi dati vengono poi filtrati andando a rimuovere tutti quei tempi di fermo non direttamente attribuibili al sistema o ad una parte di esso ( come ad esempio i fermi dovuti all'assenza di operatori o alla mancanza di materie prime nelle diverse unità). Nella Figura 4.2 è possibile vedere un esempio di analisi relativa ad una linea di assemblaggio reale effettuata attraverso un foglio Excel.

Per i dati di vita utile dei componenti è stato, invece, necessario andare

#### 4.1. La Costruzione del Modello

---

ad adattare i dati forniti dai produttori, alle condizioni di utilizzo a cui ogni elemento viene sottoposto una volta installato nelle diverse macchine. I dati relativi ai sensori, alle telecamere e ai vari componenti elettrici, espressi in numero di cicli/colpi, hanno semplicemente richiesto che la durata della loro vita fosse espressa nel dominio del tempo andando quindi a moltiplicare le informazioni note per il tempo ciclo a cui saranno sottoposti una volta che la linea verrà avviata:

$$T_{life} = n_{MAXcycle} \cdot T_{cycle} \quad (4.1)$$

La durata della vita dei motori è stata ricavata attraverso l'applicazione della formula riportata nell'Equazione 4.2, utilizzando i dati forniti dei costruttori.

$$T_{life} = L_1 \cdot \frac{K_1}{(K_2)^2 \cdot f} \quad (4.2)$$

dove  $L_1$  rappresenta la durata della vita "standard" definita per i vari modelli di motore,  $K_1$  rappresenta il coefficiente di velocità ed è ricavato dal rapporto tra la velocità di riferimento e la velocità reale del motore,  $K_2$  rappresenta il fattore di carico e si ricava dal rapporto tra la coppia utilizzata e la massima coppia ammissibile, infine  $f$  rappresenta il tipo di utilizzo e fa riferimento ai valori standard riportati nella Tabella 4.1 [§5].

Tipo di Carico	Esempi	f
Carico Uniforme	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Operazioni continue e unidirezionali</li> <li>• Cinghie di trasporto soggette al minimo carico funzionale</li> </ul>	1
Carico Leggero	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Frequenti Start and Stop</li> <li>• Posizionamento attraverso motori passo passo</li> </ul>	1,5
Carico Medio	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Frequenti cambi di direzioni istantanei</li> <li>• Frequenti frenate nei motori AC o start and stop per servomotori brushless</li> </ul>	2

Tabella 4.1: Fattore tipo di Carico  $f$

## 4.1. La Costruzione del Modello

Cause	Final Parameters and Index Prediction													
	All Data													
	Distribuzione Esponenziale						Distribuzione Weibull				At	60	$\beta$ 0,92	$\beta$ 0,5
Unità	$\lambda$ [stop/min]	$\mu$ [rip/min]	MTBF [min]	MTTR [min]	A	R	$\lambda$ [stop/min]	$\mu$ [rip/min]	MTBF [min]	MTTR [min]	A	R		
U01	-	-	-	-	100,00%	100,00%	-	-	-	-	100,00%	100,00%		
U02	-	-	-	-	100,00%	100,00%	-	-	-	-	100,00%	100,00%		
U03	0,007	0,667	148,500	1,500	99,00%	99,33%	0,004	0,667	223,970	1,500	99,33%	99,96%		
U04	0,007	0,500	148,000	2,000	98,67%	99,33%	0,004	0,500	223,216	2,000	99,11%	99,96%		
U05	0,022	0,754	46,358	1,326	97,22%	97,87%	0,0143	0,754	69,918	1,326	98,14%	99,86%		
U06	-	-	-	-	100,00%	100,00%	-	-	-	-	100,00%	100,00%		
U07	0,139	1,000	7,219	1,000	87,83%	87,06%	0,092	1,000	10,887	1,000	91,59%	99,11%		
U08	-	-	-	-	100,00%	100,00%	-	-	-	-	100,00%	100,00%		
U09	-	-	-	-	100,00%	100,00%	-	-	-	-	100,00%	100,00%		
U10	-	-	-	-	100,00%	100,00%	-	-	-	-	100,00%	100,00%		
U11	-	-	-	-	100,00%	100,00%	-	-	-	-	100,00%	100,00%		
U12	0,041	0,875	24,571	1,143	95,56%	96,01%	0,027	0,875	37,059	1,143	97,01%	99,74%		
U13	-	-	-	-	100,00%	100,00%	-	-	-	-	100,00%	100,00%		
U14	-	-	-	-	100,00%	100,00%	-	-	-	-	100,00%	100,00%		
U15	-	-	-	-	100,00%	100,00%	-	-	-	-	100,00%	100,00%		
U16	-	-	-	-	100,00%	100,00%	-	-	-	-	100,00%	100,00%		
U17	0,008	1,000	130,964	1,000	99,24%	99,24%	0,005	1,000	197,522	1,000	99,50%	99,95%		
Linea	0,222	4,796	4,506	1,104	80,33%	80,10%	0,147	4,796	6,796	1,104	86,03%	98,58%		

operazione di filtraggio dei dati



	Final Parameters and Index Prediction													
	All Data													
	Distribuzione Esponenziale						Distribuzione Weibull				At	60	$\beta$ 0,9	$\beta$ 0,5
Unità	$\lambda$ [stop/min]	$\mu$ [rip/min]	MTBF [min]	MTTR [min]	A	R	$\lambda$ [stop/min]	$\mu$ [rip/min]	MTBF [min]	MTTR [min]	A	R		
U01	-	-	-	-	100,00%	100,00%	-	-	-	-	100,00%	100,00%		
U02	-	-	-	-	100,00%	100,00%	-	-	-	-	100,00%	100,00%		
U03	-	-	-	-	100,00%	100,00%	-	-	-	-	100,00%	100,00%		
U04	-	-	-	-	100,00%	100,00%	-	-	-	-	100,00%	100,00%		
U05	0,018	0,929	54,073	1,077	98,05%	98,17%	0,0111	0,929	90,480	1,077	98,82%	99,88%		
U06	-	-	-	-	100,00%	100,00%	-	-	-	-	100,00%	100,00%		
U07	0,139	1,000	7,219	1,000	87,83%	87,06%	0,083	1,000	12,079	1,000	92,35%	99,11%		
U08	-	-	-	-	100,00%	100,00%	-	-	-	-	100,00%	100,00%		
U09	-	-	-	-	100,00%	100,00%	-	-	-	-	100,00%	100,00%		
U10	-	-	-	-	100,00%	100,00%	-	-	-	-	100,00%	100,00%		
U11	-	-	-	-	100,00%	100,00%	-	-	-	-	100,00%	100,00%		
U12	-	-	-	-	100,00%	100,00%	-	-	-	-	100,00%	100,00%		
U13	-	-	-	-	100,00%	100,00%	-	-	-	-	100,00%	100,00%		
U14	-	-	-	-	100,00%	100,00%	-	-	-	-	100,00%	100,00%		
U15	-	-	-	-	100,00%	100,00%	-	-	-	-	100,00%	100,00%		
U16	-	-	-	-	100,00%	100,00%	-	-	-	-	100,00%	100,00%		
U17	0,339	1,000	2,946	1,000	74,66%	71,22%	0,203	1,000	4,930	1,000	83,14%	97,83%		
Linea	0,496	2,929	2,014	1,003	66,76%	60,87%	0,297	2,929	3,371	1,003	77,07%	96,85%		

Figura 4.2: Analisi dei Dati di Guasto - Filtro dati

### 4.1.1 Gli Indici di Efficienza

Come definito nel capitolo precedente, il calcolo dell'efficienza complessiva richiede che siano noti i rapporti di Disponibilità, Prestazioni e Qualità del sistema. I valori di questi indici di efficienza per l'intero sistema sono ricavati a partire dall'analisi delle singole unità e della loro interconnessione fisica e logica.

Per ottenere il valore dell'OEE del sistema si devono necessariamente ricavare i valori di tutti i parametri delle singole unità, e prima ancora quelli delle singole macchine, che lo compongono.

Di seguito verrà analizzato il metodo utilizzato per ricavare il valore per gli indici di Disponibilità e Affidabilità, Prestazioni e Qualità sfruttando la teo-

ria definita in precedenza e rivedendola in modo che possa essere utilizzata per effettuare delle stime.

### Disponibilità

Partendo nuovamente dalla definizione data nel Capitolo 3 la disponibilità può essere vista come il rapporto:

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (4.3)$$

Considerando i sistemi riparabili, e sfruttando la teoria dell'affidabilità è possibile ricavare la stima del valore del parametro MTBF

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (4.4)$$

Questo quando il valore del tempo medio tra due guasti di un componente è riferito alla fase di vita utile dove il tasso di guasto può essere considerato costante. Per ottenere il parametro MTBF del sistema è necessario considerare la sua rappresentazione attraverso il diagramma RBD e ricavare così il valore complessivo del tasso di guasto  $\lambda_{sistema}$ .

A questo punto è semplice ottenere

$$MTBF_{sistema} = \frac{1}{\lambda_{sistema}} \quad (4.5)$$

Non si è mai parlato finora di come è possibile ricavare una stima del parametro MTTR. Ricordando che rappresenta il tempo medio di riparazione dei componenti, è possibile “slegarlo” dal numero di guasti sfruttando la teoria dell'affidabilità [12].

Considerando il caso di componenti in serie<sup>1</sup>, il valore di questo parametro può essere visto come:

$$MTTR = \frac{\sum_{i=0}^n \lambda_i \cdot r_i}{\sum_{i=0}^n \lambda_i} \quad (4.6)$$

---

<sup>1</sup>Nel caso di componenti in parallelo è possibile utilizzare il valore massimo del parametro  $r$  di ogni ridondanza e applicare poi la seguente formula per le unità risultanti, costituite da uno o più componenti, in serie

dove  $\lambda_i$  rappresenta il tasso di guasto e  $r_i$  il tempo tecnico di sostituzione o riparazione<sup>2</sup> dell' $i$ -esimo componente.

Nel caso in cui il tasso di riparazione, ovvero la probabilità che la riparazione venga terminata tra  $t$  e  $t+dt$ , possa essere considerato costante il parametro può essere definito come

$$MTTR = \frac{1}{\mu} \quad (4.7)$$

É possibile a questo punto riscrivere la definizione di Disponibilità e definire la funzione di Indisponibilità  $I(t)$  [13] come:

$$\begin{aligned} A(t) &= \frac{\mu}{\mu + \lambda} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \cdot e^{-(\lambda + \mu)t} \\ I(t) &= \frac{\lambda}{\mu + \lambda} + \frac{\mu}{\lambda + \mu} \cdot e^{-(\lambda + \mu)t} \end{aligned} \quad (4.8)$$

Per le quali valgono le seguenti proprietà

$$\begin{aligned} t \rightarrow 0 & \quad A(0) = 1 \quad I(0) = 0 \\ t \rightarrow \infty & \quad A(\infty) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad I(\infty) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \end{aligned} \quad (4.9)$$

Per un sistema “normale” si ha che

$$MTBF \gg MTTR \implies \lambda \ll \mu \quad (4.10)$$

Ciò significa che il termine di transitorio di  $A(t)$  si esaurisce in un tempo molto piccolo rispetto al tempo medio di guasto e quindi è possibile scrivere

$$A(t) \sim A(\infty) = \frac{\mu}{\mu + \lambda} = \frac{\frac{1}{\lambda}}{\frac{1}{\mu} + \frac{1}{\lambda}} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (4.11)$$

Essendo che i valori impiegati per il calcolo dell'efficienza del modello si riferiscono alla vita utile dei componenti, il valore del tasso di guasto e di riparazione possono essere considerati costati. É quindi possibile utilizzare indistintamente le diverse formulazioni per il calcolo dei parametri MTBF e MTTR<sup>3</sup>.

<sup>2</sup>Il valore di questo parametro è solitamente considerato noto, già in fase di progetto

<sup>3</sup>In particolare per il parametro MTBF si utilizza l'equazione 4.4, mentre per MTTR l'equazione 4.6

Nella sezione 4.1 si è visto come il modello sia costituito da tre parti relative ad altrettanti tipi di dato. Per ognuna di esse verrà effettuata un'analisi che porterà a ricavare i valori di  $\lambda$ ,  $\mu$ , MTTR e MTBF.

Per ricavare un valore complessivo della stima è necessario integrare tra loro i dati provenienti dalle prove di collaudo, dai datasheet e dalla progettazione e seguire un procedimento differente a seconda del parametro che si sta considerando.

Il valore parametro MTBF viene ricavato attraverso la somma dai tassi di guasto provenienti dalle diverse "parti" del modello. Viene eseguita la somma per prendere in considerazione il caso peggiore, anche se, grazie alla distribuzione di Weibull, ogni dato sarà opportunamente adattato affinché sia rappresentativo della specifica fase di vita del componente.

Il parametro MTTR, invece, viene ricavato considerando  $r$  come una media dei tempi tecnici che le varie riparazioni/sostituzioni richiedono nelle diverse fasi e utilizzando il valore dei  $\lambda$  impiegati precedentemente per il calcolo del MTBF.

### Affidabilità

Per quanto riguarda l'Affidabilità si sfruttano le stesse considerazioni sul tasso di guasto fatte per la Disponibilità.

Ricordando poi che l'indice  $R$  si calcola come:

$$R(t) = e^{-\lambda(t)t} \quad (4.12)$$

Considerando le relazioni tra le diverse unità, a seconda della specifica rappresentazione RBD, è possibile ottenere l'affidabilità complessiva del sistema.

$$R_{line}(t) = e^{-\lambda_{line}(t)t} \quad (4.13)$$

### Prestazioni

Prima di entrare in merito al significato, la relazione e le conseguenze proprie di questo indice è necessario andare a definire quello che è chiamato *tempo ciclo*  $T_c$  delle unità e dell'impianto.

Si definisce tempo ciclo di un'unità il tempo di attraversamento della stessa calcolato come la somma del tempo di lavorazione e del tempo di trasporto.

$$T_c = T_{lav} + T_t \quad (4.14)$$

Il tempo ciclo del sistema risulta poi essere il massimo tra i  $T_c$  delle diverse unità ( $T_c$  del collo di bottiglia)

$$T_{c_{line}} = MAX\{T_{c_i}\} \quad (4.15)$$

$T_{c_{line}}$  sarà considerato il tempo ciclo di riferimento da utilizzare nel calcolo dell'OEE.

L'indice di prestazione è utilizzato per modellizzare le inefficienze legate ai cali di velocità e alle microfermate che possono avvenire nelle unità di un impianto durante il ciclo di lavoro. Strettamente legata al valore di prestazioni di un impianto è la sua produttività che risente fortemente delle variazioni di ritmo produttivo.

Come già introdotto dalla teoria nel capitolo 3, è possibile considerare il valore di questo indice come formato da due contributi. Un primo contributo è dato dalla piena o parziale disponibilità a produrre della macchina come conseguenza delle microfermate che possono avvenire. Il secondo, dipendente dal primo, considera il cambio di ritmo produttivo che l'eventuale parziale disponibilità della macchina comporta.

Dal punto di vista operativo il calcolo dell'indice di prestazioni sfrutta gli eventuali dati noti, delle possibili microfermate, per andare a ricavare il valore della percentuale di utilizzo dell'unità. Come è ovvio pensare, a seconda del tipo di configurazione del sistema, questo indice può diventare più o meno incisivo. Successivamente viene calcolato il tempo ciclo  $T_c$  al netto delle microfermate.

A questo punto è possibile ricavare il valore finale del parametro moltiplicando la percentuale di utilizzo per il rapporto tra il tempo ciclo previsto da progetto e quello realizzabile al netto delle inefficienze emerse.

Come indice di prestazioni per il sistema viene quindi scelta l'unità peggiore che quindi costituirà il limite di prestazioni raggiungibili.

$$Rv = U \cdot \frac{T_{c_{idle}}}{T_{c_{actual}}} = \frac{MTBF_r}{MTBF_r + MTTR_r} \cdot \frac{T_{c_{idle}}}{T_{c_{actual}}} \quad (4.16)$$

Nell'equazione 4.16 sono presenti i parametri  $MTBF_r$  e  $MTTR_r$  che vengono utilizzati per "modellizzare" le inefficienze dovute alle microfermate e non corrispondono a quelli utilizzati nel paragrafo precedente per il calcolo della disponibilità.

Questi, se noti, possono essere inseriti nel modello, oppure verranno calcolati sulla base dei dati a disposizione<sup>4</sup>.

É ora necessario andare a definire come questo indice contribuisce alla stima del valore finale dell'OEE.

L'efficienza complessiva considera infatti come valore del tempo ciclo di riferimento, il valore che l'impianto ha nel momento in cui la si sta calcolando. In questo modo le eventuali inefficienze che provocano cambi di ritmo produttivo non vengono inseriti nel valore finale, ma andranno ad influenzare solo la produttività del sistema. Il contributo maggiore al valore finale dell'OEE sarà quindi dato da quella che è stata definita la percentuale di utilizzo delle unità.

### Qualità

Ricavare un metodo in grado di determinare il livello di qualità dei prodotti presenta molte difficoltà dovute alla natura dei componenti in gioco. Ottenere l'indice di qualità di un'unità o un impianto di produzione significa andare a quantificare un proprietà strettamente qualitativa di un prodotto.

Per arrivare alla formulazione matematica della percentuale di scarti prodotta da un'unità è necessaria un'analisi dei fattori e delle cause che non permettono una buona produzione.

Nel caso del modello è stato effettuato uno studio, senza entrare nel dettaglio delle specifiche cause di guasto alle macchine che possono portare ad un abbassamento della qualità, delle diverse possibilità di generazione degli scarti durante il processo di produzione.

Partendo dall'analisi mostrata in Figura 4.3, è stata costruita una relazione tra la percentuale di scarti e le cause che sono state trovate.

Nell'equazione 4.17 viene riportata la formulazione della percentuale di scarti generati da un'unità impiegata nel modello e che è stata verificata attraverso i risultati ottenuti dalle diverse prove eseguite sugli impianti.

$$\%Scarti_{unit} = \gamma \cdot \lambda \cdot R_{unit} \cdot T_{c_{unit}} \quad (4.17)$$

dove il parametro  $\gamma$  rappresenta il tipo di unità che si sta considerando

$$\begin{cases} \gamma = 1 & \text{Lavorazione o Test} \\ \gamma = 0 & \text{Altimenti} \end{cases} \quad (4.18)$$

---

<sup>4</sup>Nel caso il modello venga applicato ad un impianto completamente nuovo l'indice di prestazioni, a meno di dati noti, sarà considerato ideale

Estendendo poi il calcolo all'intero impianto si ottiene che:

$$\%Scarti_{line} = \frac{N_t + N_w}{N} \cdot \lambda_{line}(t) \cdot R_{line}(t) \cdot A_{line}(t) \cdot T_{c_{line}} \quad (4.19)$$

dove  $N_t$  indica il numero di unità di test,  $N_w$  indica il numero di unità che eseguono lavorazioni,  $N$  il numero complessivo di unità e  $T_{c_{line}}$  indica il tempo ciclo del sistema espresso in minuti.

Entrando più nel dettaglio delle componenti dell'equazione 4.19

- $\frac{N_t + N_w}{N}$  rappresenta la probabilità che una stazione possa generare uno scarto;
- $\lambda(t)_{line} \cdot R(t)_{line} \cdot T_{c_{line}}$  rappresenta la probabilità di guasto di una stazione durante un ciclo di lavoro;
- $A(t)_{line}$  è inserito per effettuare il calcolo della generazione degli scarti al netto della disponibilità dell'impianto;

Una volta ottenuta la percentuale di generazione degli scarti, è possibile ricavare l'indice di qualità come:

$$Rq = 1 - \%Scarti_{line} \quad (4.20)$$

**Osservazioni** Come si è ampiamente spiegato nel capitolo 3 la distribuzione Weibull può essere impiegata per definire la funzione di densità di probabilità di guasto. Nel modello si è scelto di impiegare la distribuzione a due parametri in cui il parametro di forma  $\beta$  assume valori diversi a seconda della fase di vita dei componenti e del tipo di impianto che si sta considerando, mentre il parametro di scala  $\eta$  è stato posto uguale a  $\frac{1}{\lambda}$ , dove  $\lambda$  è corrisponde al tasso di guasto istantaneo.

Questa ipotesi non toglie nulla all'analisi e alla correttezza dell'applicazione della distribuzione di Weibull di cui si è comunque verificata l'applicabilità attraverso un test per la verifica delle ipotesi [14].

#### 4.1. La Costruzione del Modello

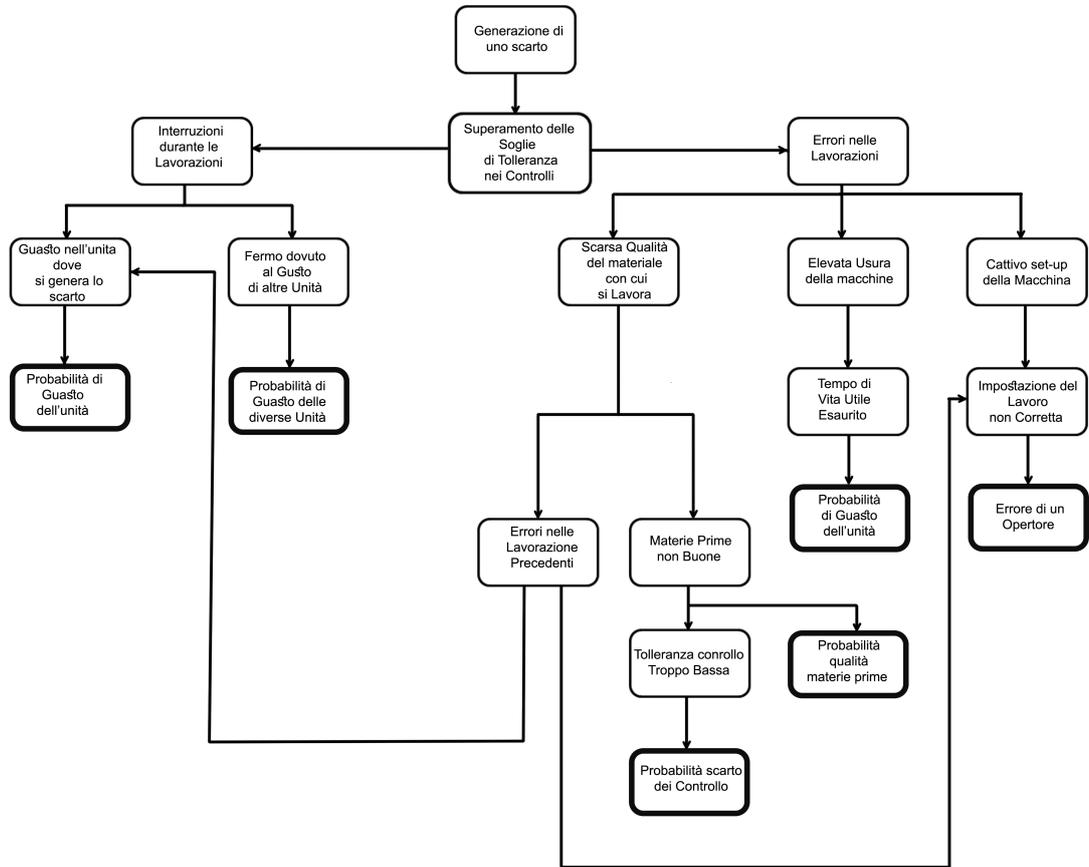


Figura 4.3: Analisi delle Cause di Generazione degli Scarti

## 4.2 Applicazione a Linee Reali

In questa sezione verranno analizzati i risultati che si sono ottenuti applicando il modello a tre diversi sistemi realizzati dall'azienda.

Per ogni linea di assemblaggio verrà presentato un schema semplificato del layout, inserendo anche il flusso dei materiali, lo schema RBD impiegato per definire le relazioni tra le diverse unità e una breve descrizione dell'impianto.

In particolare verranno considerati tre tipi di linea di assemblaggio<sup>5</sup> che l'azienda produce: il primo, la *Linea A*, sarà costituita da sole unità disposte in serie tra loro; la *Linea B* presenta invece delle unità in parallelo ed un ritmo di produzione elevato; l'ultimo esempio, *Linea C*, rappresenta una linea più complessa in cui sono presenti, non solo ridondanze all'interno delle unità, ma parallelismi di interi sottosistemi.

Per le linee A e B verrà poi eseguita un'analisi dei risultati ottenuti attraverso il modello confrontandoli, dove possibile, con i dati reali di efficienza e produttività degli impianti, ricavati durante il loro funzionamento. Per la linea C verranno solamente ricavate delle stime dei valori di efficienza in quanto questo sistema è tutt'ora in fase di realizzazione. Una volta che verrà ultimato sarà possibile confrontare i risultati ottenuti con i dati reali e verificare se il modello fornisce valori attendibili anche per impianti con dimensioni e un livello di complessità maggiori.

---

<sup>5</sup>Per questioni di sicurezza e privacy non saranno utilizzati i veri nomi degli impianti e non potranno essere riportati i valori reali di efficienza e produttività delle linee. Verranno riportati nomi generici e, per il confronto dei risultati, si riporterà il valore assoluto dell'errore percentuale tra il valore valore stimato e quello effettivo dell'efficienza complessiva.

## 4.2. Applicazione a Linee Reali

**Common Parameters Value**

Component	to_ref[s]	N/Pieces / N/ Shots	Duration [Years] / MTEF	Duration [h]	T_Stop [min]
WEIBULL	1		60,00		

**Unità**

Unità	To_used[s]
Distance [h]	Length_Stop[min]
Component	To_ref[s] Life_time[h] T_Stop[min]

**Unità**

Performance	m1	m2	m3
Length_Stop [min]	0	0	0
Distance_stop [h]	0	0	0
Availability*	m1	m2	m3
Length_Stop [min]			
Distance_stop [h]			

**Historical Value**

Historical Value	IMPOSED VALUE
MTTR[min]	0,00
MTBF[min]	0,00

**Availability - Reliability**

Description	Unità	Config_Unità	Historical data
Unità1			
Unità2			
Unità3			
Unità4			
Unità5			
Unità6			
Unità7			
Unità8			
Unità9			
Unità10			
Unità11			
Unità12			
Unità13			
Unità14			
Unità15			
Unità16			
Unità17			
Unità18			
Unità19			
Unità20			

**Historical data**

Unità	m1	m2	m3	m1	m2	m3
Unità1						
Unità2						
Unità3						
Unità4						
Unità5						
Unità6						
Unità7						
Unità8						
Unità9						
Unità10						
Unità11						
Unità12						
Unità13						
Unità14						
Unità15						
Unità16						
Unità17						
Unità18						
Unità19						
Unità20						

- Dati dai Collaudi
- Dati dai Datasheet
- Dati dalla Progettazione

Figura 4.4: Interfaccia Grafica del Modello - Inserimento Dati

### 4.2.1 Linea A

Questo sistema è costituito da 15 unità poste tutte in serie tra loro, impiegate per l'assemblaggio di uno statore completo contenente 6 bobine avvolte. La produzione di questo tipo di oggetto richiede diverse operazioni tra cui: il caricamento dei cartocci<sup>6</sup> e dello scheletro dello statore, l'avvolgimento del filo, la saldatura di contatti, l'inserimento degli avvolgimenti, la smussatura

<sup>6</sup>Plastica attorno alla quale viene avvolto il filo di rame per la formazione di una bobina

dello scheletro, test elettrici e test con telecamera.

L'unica operazione svolta da un operatore è il caricamento iniziale dello scheletro dello statore su un pallet che si inserisce nel sistema, per il resto la linea è completamente automatizzata.

In Figura 4.5 viene riportata la disposizione fisica delle diverse unità e il ciclo di produzione dello statore.

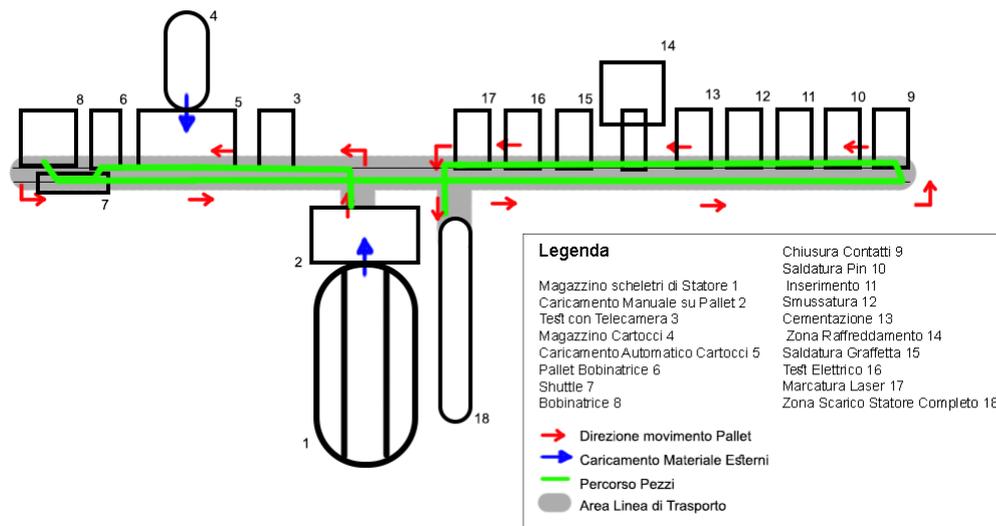


Figura 4.5: Layout Linea A

Come si è sottolineato nel Capitolo 3, per definire le relazioni tra le diverse unità non si utilizza la disposizione fisica, ma è necessario rappresentare il sistema secondo il metodo RBD per evidenziarne le relazioni funzionali.

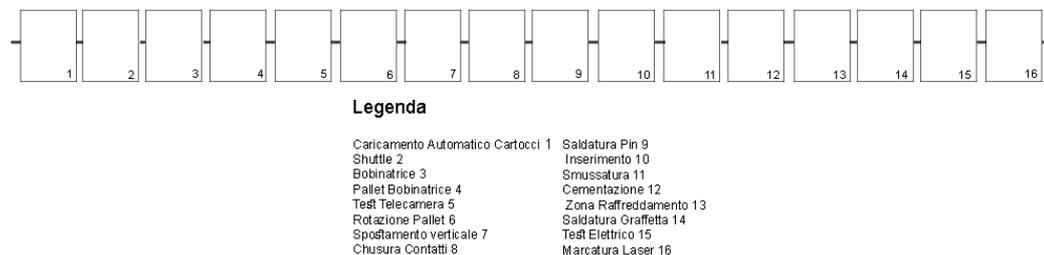


Figura 4.6: Rappresentazione RBD Linea A

È possibile notare come ci siano differenze tra le due rappresentazioni, non solo nella posizione delle unità, ma anche nelle unità presenti. Non si tratta

## 4.2. Applicazione a Linee Reali

di un errore, ma semplicemente nella diagramma RBD vengono inserite solo le unità, o parti di esse<sup>7</sup>, che funzionano indipendentemente dall'intervento di un operatore e per le quali i possibili guasti non dipendono da un errore umano, ma da un problema tecnico.

Risulta ora evidente che tutte le unità sono disposte in serie tra loro, il che comporta che il guasto di una sola unità impone il fermo di tutta la linea. La scelta di questo tipo di configurazione richiede un elevato livello di affidabilità delle macchine al fine di poter raggiungere valori di efficienza accettabili..

Definito che le unità sono connesse in serie tra loro è possibile ricavare il valore dei vari indici di efficienza e l'OEE complessivo della linea utilizzando il modello.

Unit	Descrizione	PE2_Code			MTTR [min]	MTBF [min]	A	Rv	Rq	R	OEE
		m1	m2	m3							
Unità1	Conses Loading	-	-	-	3,17	1.665,04	99,45%	100,00%	99,99%	99,94%	99,44%
Unità2	Shuttle	-	-	-	1,15	328,43	99,65%	100,00%	99,96%	99,70%	99,61%
Unità3	Winding Machine	-	-	-	17,84	5.147,59	99,65%	100,00%	100,00%	100,00%	99,65%
Unità4	Pallet Winding Machine	-	-	-	2,83	477,16	99,41%	100,00%	99,97%	99,79%	99,38%
Unità5	Camera Test	-	-	-	2,05	2.682,68	99,92%	100,00%	99,99%	99,96%	99,92%
Unità6	Rotational Pallet	-	-	-	60,00	27.736,69	99,78%	100,00%	100,00%	100,00%	99,78%
Unità7	Vertical Pallet	-	-	-	60,00	20.999,39	99,72%	100,00%	100,00%	100,00%	99,71%
Unità8	Closing hook	-	-	-	360,00	46.135,81	99,23%	100,00%	100,00%	100,00%	99,23%
Unità9	Welding Pins	-	-	-	4,13	636,85	99,36%	100,00%	99,98%	99,84%	99,33%
Unità10	Insertion	-	-	-	1,60	178,32	99,11%	100,00%	99,92%	99,44%	99,03%
Unità11	Chamfering	-	-	-	60,00	44.693,69	99,87%	100,00%	100,00%	100,00%	99,87%
Unità12	Cementation	-	-	-	0,44	383,22	99,88%	100,00%	99,96%	99,74%	99,85%
Unità13	Buffer	-	-	-	60,00	44.798,69	99,87%	100,00%	100,00%	100,00%	99,87%
Unità14	Agrafes Welding	-	-	-	1,06	4.233,64	99,97%	100,00%	100,00%	99,98%	99,97%
Unità15	Final Test	-	-	-	0,09	436,04	99,98%	100,00%	99,97%	99,77%	99,95%
Unità16	Marking	-	-	-	60,00	27.999,18	99,79%	100,00%	100,00%	100,00%	99,79%
Unità17	-	-	-	-	-	-	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
Unità18	-	-	-	-	-	-	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
Unità19	-	-	-	-	-	-	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
Unità20	-	-	-	-	-	-	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
					2,86	53,16	94,77%	100,00%	99,99%	98,16%	94,75%
					Target		98,00%	95,00%	99,50%	90,00%	92,63%
										OEE*	94,75%

Figura 4.7: Dati di Stima degli Indici di Efficienza

I risultati presenti in Figura 4.7 sono stati ottenuti utilizzando sia i dati emersi dal collaudo della linea, sia quelli relativi alla vita utile dei singoli componenti che quelli noti in fase di progetto rappresentanti le operazioni che è necessario eseguire periodicamente sulla macchina, ma che non sono stati adattati alla fasi di vita che rappresentano.

Dalla Figura 4.7 è anche possibile individuare che l'unità *collo di bottiglia*

<sup>7</sup>Le unità 4,5,6 e 7 del diagramma RBD sono tutte contenute nell'unità 6 del layout

della linea, ovvero con minor efficienza, è l'unità 10.

Per validare il modello sono stati eseguiti vari confronti con i dati reali al fine di ottenere il miglior valore per i parametri utilizzati per effettuare la stima:

# 1.a Impostando il modello per essere utilizzato per stimare i valori di efficienza ottenuti, dalla linea, nella fase di collaudo, utilizzando tutti i dati a disposizione, si sono ottenuti i risultati riportati in tabella 4.2:

Disponibilità	Prestazioni	Qualità	OEE
95,33%	100%	99,98%	95,31%

Tabella 4.2: Stima Efficienza in Fase di Collaudo (utilizzando tutti i dati a disposizione)

Dal confronto con i dati reali si è constatato un errore percentuale sull'OEE dello 0,03%.

# 1.b Inserendo, invece, nel modello solo i dati di collaudo :

Disponibilità	Prestazioni	Qualità	OEE
95,32%	100%	99,96%	95,29%

Tabella 4.3: Stima Efficienza in Fase di Collaudo (utilizzando solo i dati di collaudo)

Ottenendo un errore percentuale sull'OEE dello 0,01%.

# 2.a Attraverso l'inserimento dei dati di collaudo e impostando il modello per ottenere i valore dei diversi indici durante la fase di vita utile, che è il caso di interesse, si sono ottenuti i risultati riportati in Tabella 4.4 con un errore sull'OEE dello 0,97%.

Disponibilità	Prestazioni	Qualità	OEE
94,82%	100%	99,95%	94,77%

Tabella 4.4: Stima Efficienza in Fase di Vita Utile (utilizzando solo i dati di collaudo)

## 4.2. Applicazione a Linee Reali

# **2.b** Si è anche provato ad inserire solo i dati di vita dei componenti ottenendo:

Disponibilità	Prestazioni	Qualità	OEE
97,75%	100%	99,99%	97,74%

Tabella 4.5: Stima Efficienza in Fase di Vita Utile (utilizzando solo i dati di vita dei componenti)

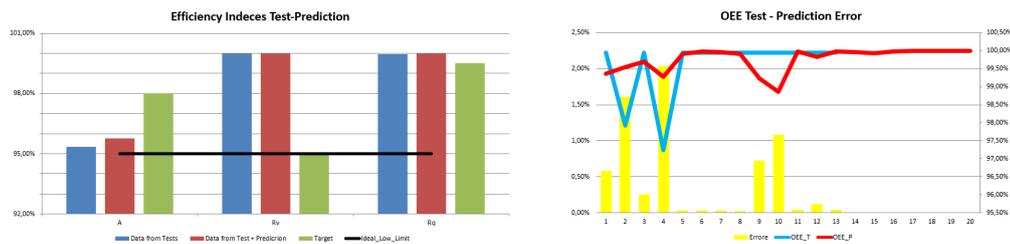
Ottenendo un errore percentuale sull'OEE dello 2%

I risultati, ottenuti utilizzando tutti i dati e correggendo i parametri di stima in funzione dei risultati precedenti, per del valore della stima dell'efficienza complessiva dell'impianto sono riportati in Tabella 4.6

Disponibilità	Prestazioni	Qualità	OEE
95,78%	100%	99,98%	95,76%

Tabella 4.6: Stima Efficienza in Fase di Vita Utile (utilizzando tutti i dati a disposizione)

L'errore commesso sul valore complessivo dell'OEE è pari allo 0,02%.



(a) Indici di Efficienza Modello - Reali

(b) OEE Modello - Reale

Figura 4.8: Confronto tra Risultati ottenuti dal modello e dati reali

In Figura 4.8 è possibile vedere come i dati ottenuti dal modello di previsione siano attendibili rispetto ai dati reali del sistema.

Va anche sottolineato che la conoscenza dei dati di collaudo, o meglio dei dati

di guasto delle diverse unità, sia di grande importanza per il calcolo della stima, ma non basti per avere valori del tutto rappresentativi. Questo perché durante la fase di raccolta dei dati, non tutti i guasti si verificano, quindi l'aggiunta dei dati relativi alla vita utile va a completare le informazioni a disposizione. Inoltre considerando entrambe le tipologie di dato, il rischio di sovradimensionare il valore del rateo di guasto  $\lambda_i$  delle diverse unità non è così rilevante in quanto i valori dei  $\lambda_{i_{test}}$  sono significativamente maggiori rispetto ai  $\lambda_{i_{life}}$ , quindi nel caso vengano impiegati entrambi il valore proveniente dai dati di vita dei componenti risulterà trascurabile rispetto a quelli delle prove.

Dal confronto con i dati reali è quindi emerso che il modello fornisce valori sufficientemente precisi e quindi possa essere impiegato per stimare l'efficienza di un impianto.

Da ultimo si è voluto verificare se l'inserimento di un buffer, capace di contenere 9 prodotti e posto dopo la macchina bobinatrice, possa essere considerata una possibilità per migliorare la disponibilità complessiva della linea.

Disponibilità	Prestazioni	Qualità	OEE
96,25%	100%	99,98%	96,23%

Tabella 4.7: Incremento di Disponibilità dato dall'inserimento di un Buffer

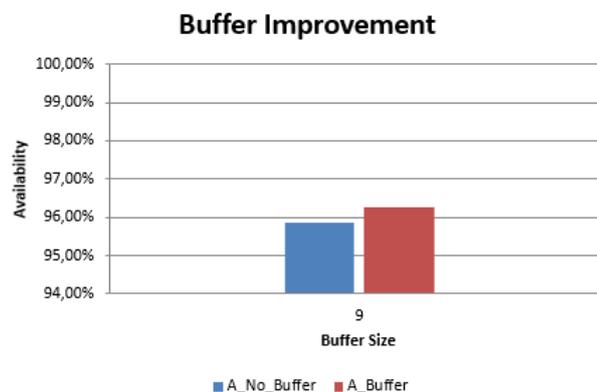


Figura 4.9: Incremento di Disponibilità dato dall'inserimento di un Buffer

## 4.2. Applicazione a Linee Reali

In Figura 4.9 è possibile vedere come l'inserimento del buffer porti ad un incremento dello 0,42% dell'efficienza complessiva della linea. Questo dato potrebbe essere ulteriormente migliorato inserendo un buffer di dimensione e in una posizione diversa. Possibilità che verrà verificata nel capitolo successivo attraverso una simulazione.

### 4.2.2 Linea B

Il secondo sistema che viene analizzato è una linea di assemblaggio per la produzione di bobine. La linea presenta un numero di unità simile alla precedente ed integra dei parallelismi tra le diverse macchine.

Come fatto nella sezione 4.2.1 si procederà con l'analisi del layout e del ciclo produttivo, la rappresentazione RBD e l'analisi dei risultati ottenuti attraverso il modello.

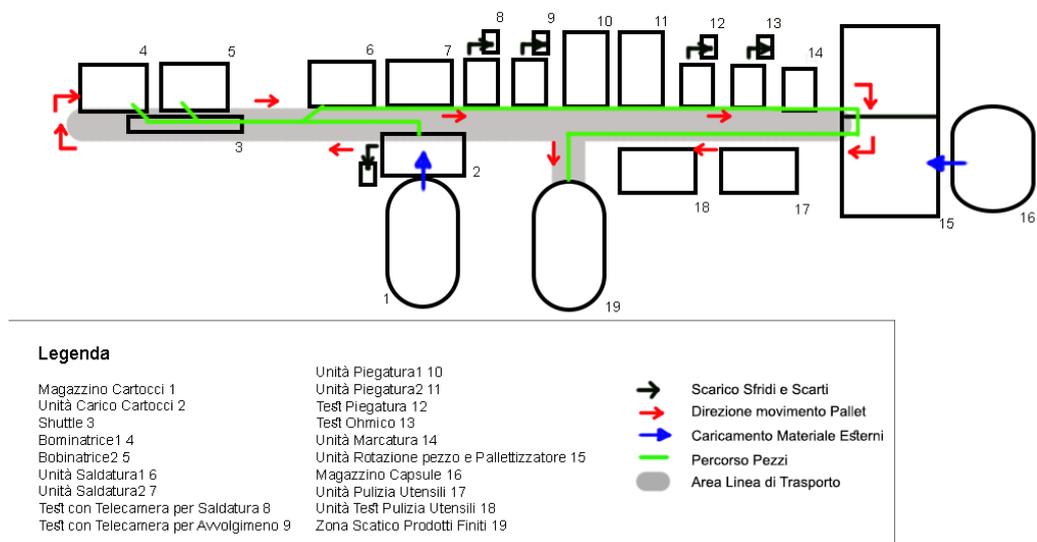


Figura 4.10: Layout Linea B

Dallo schema in Figura 4.11 è evidente che le unità di bobinatura, saldatura e piegatura sono tutte composte da due macchine in parallelo a funzionamento permanente. Questo significa che entrambe saranno sempre in funzione contemporaneamente, permettendo un notevole aumento della produttività e migliorando la disponibilità della linea perché il guasto di una

sola delle macchine di queste unità non impone all'intero sistema di essere fermato.

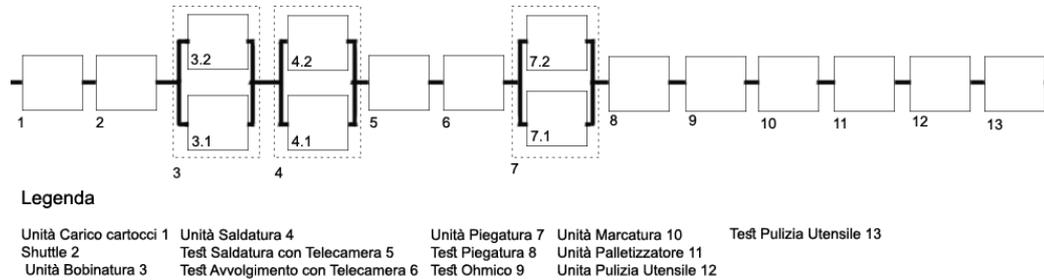


Figura 4.11: Rappresentazione RBD della Linea B

Per il calcolo della stima dell'efficienza complessiva è stato impiegato lo stesso procedimento di “taratura” dei parametri ampiamente spiegato nell'analisi della Linea A che quindi non verrà ripetuto. Si entrerà invece nel dettaglio del calcolo della disponibilità delle unità che presentano una ridondanza.

**Bobinatura** Dai dati di collaudo<sup>8</sup> è stato possibile ricavare i valori di MTBF e MTTR per ciascuna delle macchine bobinatrici:

Macchina	MTBF [min]	MTTR [min]	Disponibilità
Bobnatrice 1	98,3	1,7	98,33%
Bobnatrice 2	299	1	99,67%

Tabella 4.8: dati di Collaudo Unità Bobinatura

La differenza nel valore dei parametri delle due macchine è dovuta al diverso numero di guasti che avvengono.

Se ora considerassimo che le macchine fossero disposte in serie avremmo che il valore dell'indice di disponibilità risulterebbe pari a:

$$A_{unit\_serie} = A_{m1} \cdot A_{m2} = 98,01\% \quad (4.21)$$

<sup>8</sup>Viene eseguita l'analisi su questi dati perché si ha la possibilità di confrontarli con un caso reale

## 4.2. Applicazione a Linee Reali

---

Tuttavia, come sappiamo, in questa linea le due macchine bobinatrici sono in disposte in parallelo a funzionamento permanente e quindi il valore dell'indice si calcola come:

$$A_{unit_{parallelo}} = \{1 - [(1 - A_{mq}) \cdot (1 - A_{m2})]\} = 99,99\% \quad (4.22)$$

Confrontando i valori ottenuti è possibile affermare che

$$A_{unit_{serie}} < \min\{A_{m1}, A_{m2}\} < A_{unit_{parallelo}} \quad (4.23)$$

così come definito dalla teoria.

**Saldatura** Seguendo lo stesso procedimento si può ricavare anche il valore della disponibilità dell'unità di saldatura.

Macchina	MTBF [min]	MTTR [min]	Disponibilità
Saldatrice 1	298	2	99,33%
Saldatrice 2	300	0	100%

Tabella 4.9: dati di Collaudo Unità Saldatura

Partendo dai dati in Tabella 4.10 è possibile calcolare il valore della disponibilità reale dell'unità, e quello nel caso si fosse scelta una configurazione diversa:

Configurazione	Disponibilità
Serie	99,33%
Parallelo (Funz. Permanente)	100%
Parallelo (Stand-by)	100%

Tabella 4.10: Disponibilità Unità Saldatura

Ancora una volta si è verificato che, come espresso nel capitolo 2, attraverso la configurazione in parallelo è possibile aumentare il livello di disponibilità dell'impianto .

## 4.2. Applicazione a Linee Reali

Andando ora ad applicare il modello alla linea complessiva è possibile stimare il valore dei vari indici di efficienza.

Unit	Descrizione	PE2_Code			MTTR [min]	MTBF [min]	A	Rv	Rq	R	OEE
		m1	m2	m3							
Unità1	Cones Loading				3,98	422,58	99,07%	100,00%	100,00%	99,76%	99,07%
Unità2	Shuttle				360,00	1.373.704,66	99,97%	100,00%	100,00%	100,00%	99,97%
Unità3	Winding Machine				2,94	530,87	99,45%	100,00%	100,00%	100,00%	99,45%
Unità4	Welding Machine				5,85	719,61	99,19%	100,00%	100,00%	100,00%	99,19%
Unità5	Camera Welding Test				40,00	2.533.623,24	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
Unità6	Camera Winding Test				40,00	2.533.623,24	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
Unità7	Bending Pin				360,00	1.373.704,66	99,97%	100,00%	100,00%	100,00%	99,97%
Unità8	Bending Test				40,00	2.533.623,24	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
Unità9	Ohmic Test				180,00	6.050.413,30	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
Unità10	Marking				360,00	1.373.704,66	99,97%	100,00%	100,00%	100,00%	99,97%
Unità11	Palletizer				5,90	41.882,88	99,99%	100,00%	100,00%	100,00%	99,99%
Unità12	Tools Cleaning				60,00	6.050.413,30	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
Unità13	Cleaning Test				40,00	2.533.623,24	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
Unità14	-				-	-	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
Unità15	-				-	-	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
Unità16	-				-	-	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
Unità17	-				-	-	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
Unità18	-				-	-	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
Unità19	-				-	-	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
Unità20	-				-	-	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
					4,26	176,44	97,63%	100,00%	99,97%	99,76%	97,60%
						Target	98,00%	95,00%	99,50%	90,00%	92,63%
									OEE*		97,60%

Figura 4.12: Dati di Stima degli Indici di Efficienza

L'errore commesso sul valore dell'OEE è risultato essere pari allo 0,08% e quindi accettabile.

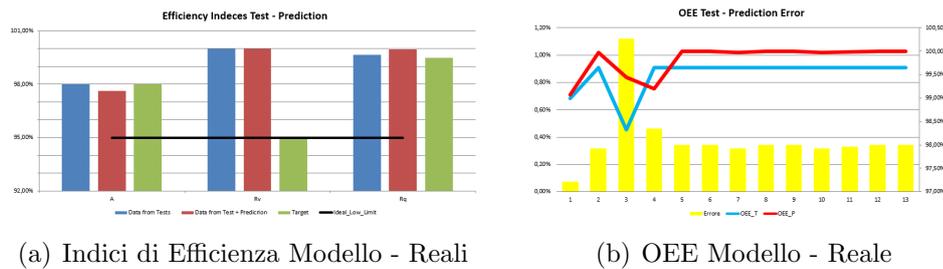


Figura 4.13: Confronto tra Risultati ottenuti dal modello e dati reali

Da ultimo, anche per questo sistema si è ipotizzato l'inserimento di un buffer di capacità 18 pezzi posizionato tra l'unità di bobinatura e di saldatura.

Dai risultati riportati in Tabella 4.11 si vede come questo porti ad un incremento di efficienza del 1,17%

## 4.2. Applicazione a Linee Reali

---

Disponibilità	Prestazioni	Qualità	OEE
98,81%	100%	99,97%	98,77%

Tabella 4.11: Incremento di Disponibilità dato dall'inserimento di un Buffer

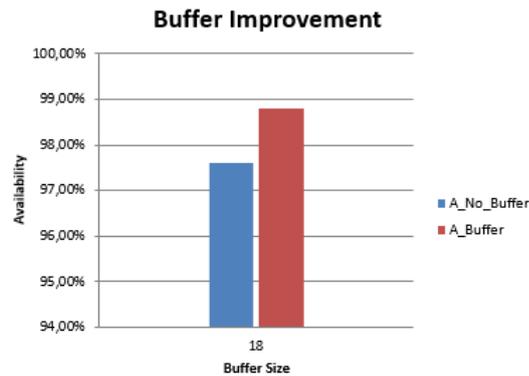


Figura 4.14: Incremento di Disponibilità dato dall'inserimento di un Buffer

### 4.2.3 Linea C

Questa linea presenta un sistema molto più grande e complesso dei casi precedenti. È costituita da 70 macchine raggruppate in 64 unità tutte completamente automatizzate. L'obiettivo di questo impianto è la modifica degli avvolgimenti presenti in un statore. Il ciclo produttivo può essere riassunto, senza entrare troppo nel dettaglio, come:

- Caricamento degli statori sulla linea;
- Avvolgimento del filo su cartocci, già inseriti una plastica apposita;
- Posizionamento di questa plastica, con le bobine avvolte, nello scheletro dello statore originale;
- Saldatura dello scheletro
- Assemblaggio finale dello statore

In più sono presenti tutta una serie di controlli e la marcatura finale del prodotto finito.

L'alta produttività richiesta alla linea a imposto un massiccio impiego di parallelismi, non solo tra le singole unità, ma anche tra interi sottosistemi .

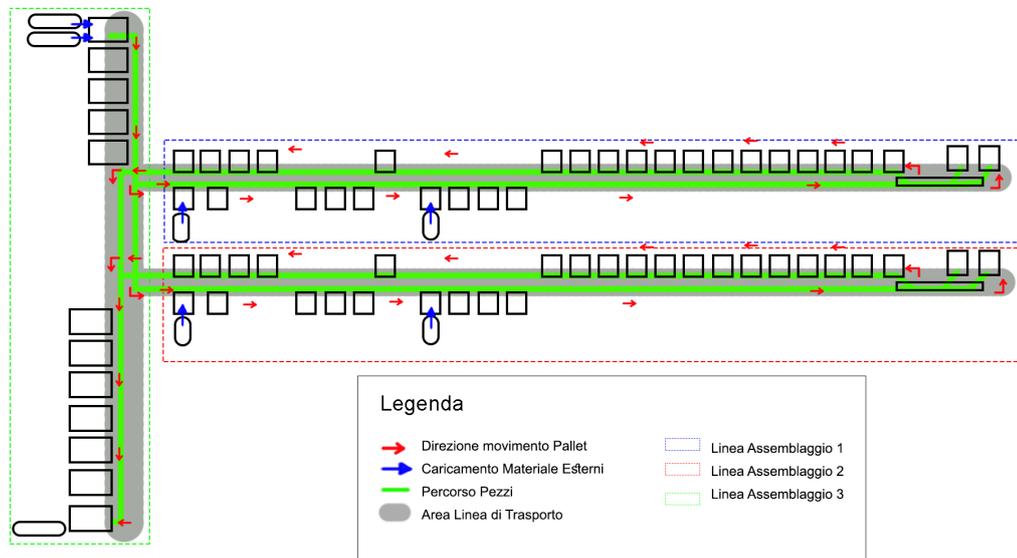


Figura 4.15: Layout Linea C

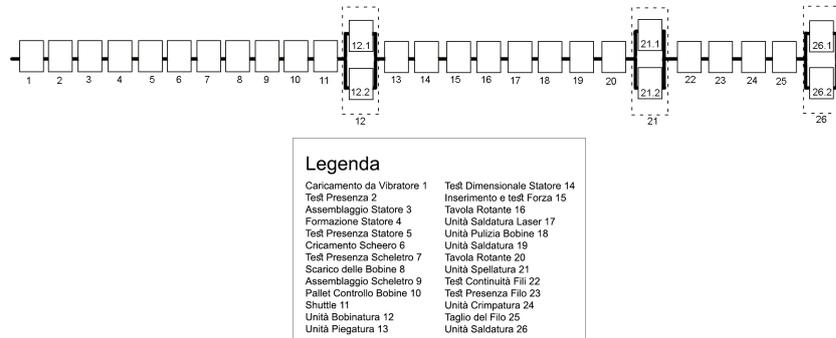
Dalla Figura 4.15 è possibile notare come l'impianto possa essere scomposto in 3 sottosistemi (Linea Assemblaggio 1, Linea Assemblaggio 2 e Linea Assemblaggio 3) che possono essere analizzati separatamente.

Prima di rappresentare il sistema secondo il metodo RDB, vengono introdotte le funzionalità di ogni sottosistema. Le **Linee di Assemblaggio 1 e 2** sono composte da unità che vanno a smontare, comporre e assemblare lo statore e sono poste in parallelo a funzionamento permanente tra loro. La **Linea di Assemblaggio 3** svolge invece tutte le operazioni di caricamento, controllo e scaricamento del prodotto dal sistema.

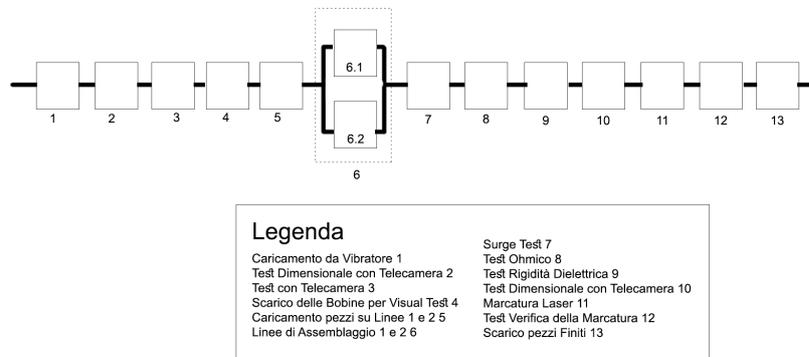
Volendo andare a definire la specifica configurazione della linea si ricava che le linee di assemblaggio 1 e 2, poste in parallelo tra loro, contengono a loro volta unità ridondanti, composte da macchine in parallelo a funzionamento permanente, quali *Bobinatura*, *Saldatura Laser* e *Spellatura dei fili*, poste in serie a tutte le altre. La terza linea invece è costituita dalla serie delle diverse unità di controllo al cui interno si inserisce il parallelo delle precedenti linee. In Figura 4.16 è possibile vedere la rappresentazione RBD<sup>9</sup> di questo sistema.

<sup>9</sup>Verrà presentata una sola rappresentazione per le linee di assemblaggio 1 e 2 in quanto sono identiche tra loro

## 4.2. Applicazione a Linee Reali



(a) Rappresentazione RBD della Linea C - Linee di Assemblaggio 1 e 2



(b) Rappresentazione RBD della Linea C - Linea di Assemblaggio 3

Figura 4.16: Rappresentazione RBD della Linea C

Viste le grandi dimensioni del sistema che si sta analizzando l'applicazione del modello è stata eseguita in 3 fasi:

- i) Applicazione alla Linea di Assemblaggio 1 e ottenimento dei risultati;
- ii) Applicazione alla Linea di Assemblaggio 2 e ottenimento dei risultati;
- iii) Applicazione alla Linea di Assemblaggio 3, inserendo anche i risultati dell'analisi delle linee 1 e 2, e ottenimento dei risultati complessivi;

Come già anticipato nelle pagine precedenti questo sistema è ancora in fase di sviluppo, quindi i valori degli indici di efficienza sono stati ricavati

utilizzando solo i dati relativi alla vita utile dei componenti e alle operazioni note<sup>10</sup>.

Linea	Disponibilità	Prestazioni	Qualità	OEE
Linea 1	96,66%	100%	99,97%	96,63%
Linea 2	96,66%	100%	99,97%	96,63%
Linea 3	98%	100%	99,95%	97,95%

Tabella 4.12: Indici di Efficienza Parziali e Totali

Per questo tipo di impianto non è stato previsto l'inserimento di un Buffer vista particolare forma del prodotto e la necessità del pallet di trasportare tre diverse parti contemporaneamente.

### 4.3 Utilizzo Inverso

In questa sezione viene presa in considerazione la possibilità di impiegare il modello per ricavare il dimensionamento meccanico, e quindi la scelta dei componenti da utilizzare nelle singole macchine, partendo dai valori di efficienza che si vogliono raggiungere. Questa possibilità è stata introdotta un'ottica di miglioramento del valore dell'efficienza complessiva attraverso una riprogettazione meccanica delle unità.

Il valore dell'OEE può essere migliorato andando ad agire sui diversi indici che lo compongono. Come si è già avuto modo di vedere, però, uno dei componenti che più determina il risultato finale dell'efficienza è il tasso di guasto  $\lambda(t)$ . Quindi per poter incrementare l'efficienza è fondamentale andare a ridurre il tasso di guasto dell'impianto agendo sulle singole unità. Come conseguenza diretta, non solo si potrà raggiungere un miglior livello di disponibilità e affidabilità, ma anche l'indice di qualità verrebbe influenzato positivamente.

In Figura 4.17 è possibile vedere come tutti gli indici che costituiscono l'OEE ammettono la possibilità di incrementare il loro valore attraverso un miglioramento del  $\lambda_{sistema}$ .

<sup>10</sup>vengono riportati solo i risultati di efficienza complessiva delle Linee 1, 2 e 3

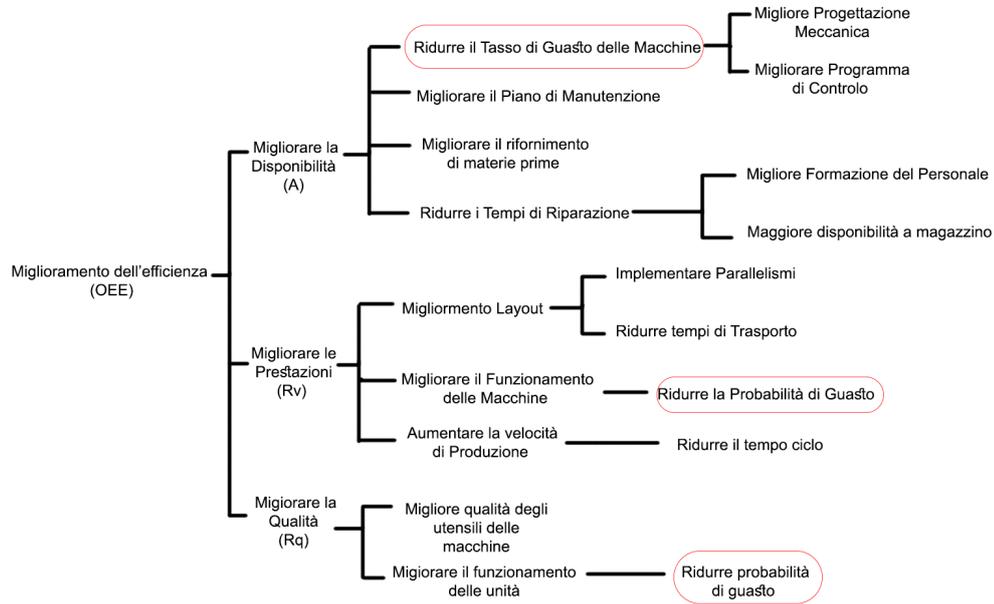


Figura 4.17: Miglioramento OEE

Attraverso l'applicazione inversa dell'equazione 4.11 è possibile ricavare il valore del parametro MTBF e di conseguenza il valore del tasso di guasto  $\lambda$  che la linea, o l'unità deve avere affinché sia raggiunto il livello di efficienza richiesto.

$$\begin{aligned}
 MTBF &= \frac{A_{rich} \cdot T_{riparazione}}{1 - A_{rich}} \\
 \lambda &= \frac{1}{MTBF}
 \end{aligned}
 \tag{4.24}$$

Una volta noto il valore del tasso di guasto che si deve raggiungere sarà possibile dimensionare i vari componenti. Tuttavia questa operazione risulta abbastanza complessa.

Quando si fa riferimento al valore di  $\lambda$  di una singola unità trovare o progettare un componente che soddisfi la richiesta comporta di dover considerare un numero di variabili decisamente elevato.

Se invece si fa riferimento al valore dell'intera linea ciò che si può fare è andare a definire un ordine di priorità in cui le varie unità possono essere prese in considerazione per essere riprogettate. Una possibile modalità di scelta consiste nel partire dal migliorare l'unità che rappresenta il collo di bottiglia

di disponibilità, le unità con i tempo ciclo più lunghi e quelle che effettuano lavorazioni particolarmente delicate. Una volta definito l'ordine secondo il quale agire si avrà un numero di variabili ancora maggiore del precedente.

Un'analisi più approfondita potrebbe portare a definire anche dei vincoli meccanici, oltre che temporali, che influiscano sul valore dell'efficienza complessiva, ma richiederebbe una maggiore conoscenza delle macchine su chi si sta lavorando e strumenti diversi da quelli impiegati per la realizzazione del modello.



# Capitolo 5

## Simulazioni

*In questo capitolo verranno presi in considerazione i risultati delle diverse simulazioni effettuate, attraverso il modello, su impianti reali presenti in azienda.*

*Sono stati effettuati tre tipi di simulazione: la prima consiste nel confronto di diverse configurazioni della linea in condizioni ideali; la seconda inserisce dei guasti e dei ritardi casuali degli operatori addetti alle macchine e permette di vedere come questi eventi abbiano un'influenza diversa, a seconda del tipo di configurazione delle unità, sui valori di efficienza e produttività; la terza vedrà la pianificazione di un possibile piano di manutenzione per la linea.*

*Per non ripetere, inutilmente, la stessa procedura, le simulazioni verranno applicate alla sola Linea B analizzata nel capitolo precedente.*

### 5.1 Confronto Tra Diverse Configurazioni

Prima di entrare nel merito dei metodi e dei risultati ottenuti dalle simulazioni viene brevemente introdotta l'interfaccia attraverso cui sono state eseguite.

## 5.1. Confronto Tra Diverse Configurazioni

Description		Line Machines - Variables Value															
Unit	Description	Type	NUnits	Unit Code (pE2)			Fault Code			Braking_Vires			Operator_Delay (min)				
				m1	m2	m3	m1	m2	m3	m1	m2	m3	m1	m2	m3		
Unit31																	
Unit32																	
Unit33																	
Unit34																	
Unit35																	
Unit36																	
Unit37																	
Unit38																	
Unit39																	
Unit310																	
Unit311																	
Unit312																	
Unit313																	
Unit314																	
Unit315																	
Unit316																	
Unit317																	
Unit318																	
Unit319																	
Unit320																	
Unit321																	
Unit322																	
Unit323																	
Unit324																	
Unit325																	
Unit326																	
Unit327																	
Unit328																	
Unit329																	
Unit330																	

Do you Want <b>IGNORE</b> Sankney Availability Parameters and <b>consider</b> just the Prediction Parameters in Complete <b>Write Y to say YES or N to say NO</b>	N	Other Line Parameters Cycle Time (s) Shift (Days per shift) 0.0014
Do you want Use the Weibull Parameters Distribution for the Historic Parameters? <b>Write Y to say YES or N to say NO</b>	N	Do you want Use the Weibull Parameters Distribution for the Life Parameters? <b>Write Y to say YES or N to say NO</b>
Do you want Use the Weibull Parameters Distribution for the Life Parameters? <b>Write Y to say YES or N to say NO</b>	Y	
How do You Want Consider the Useful Life Data of Each Machine? 1 -> <b>Fault+Life</b> , 2 -> <b>JUST Fault</b> , 3 -> <b>JUST Life</b>	1	Random Simulation Data <b>Write Y to say YES, N to say NO or SET to fit the current Parameters</b>
Which Data do You Want Consider? <b>C -&gt; Complete, H -&gt; Historical, I -&gt; Imposed</b>	C	<b>Simulation Control Panel</b> Maintenance Fault Based Simulation      Configuration Simulation with Buffer Maintenance Life Based Simulation      Configuration Simulation NO Buffer

Figura 5.1: Interfaccia Grafica - Simulazioni

Come visibile nella Figura 5.1 è stata realizzata utilizzando il software Microsoft Excel. L'interfaccia si compone di due parti: la prima permette di inserire le unità presenti nella linea, il numero e il tipo di macchine e gli eventuali guasti o errori<sup>1</sup>; la seconda parte costituisce il pannello di controllo delle simulazioni e permette di impostare i parametri da impiegare.

<sup>1</sup>Il numero di fili rotti e i ritardi degli operatori possono essere sia inseriti dall'utente che generati automaticamente in modo casuale

Come si è visto nel capitolo precedente la *Linea B* è costituita da 13 unità in serie tra loro, tre delle quali sono formate dal parallelo di due macchine (nello specifico le unità di bobinatura, di saldatura e piegatura). Questo tipo di configurazione è stato confrontato con i risultati di efficienza complessiva che si avrebbero eliminando le ridondanze presenti.

In tabella sono riportati i rispettivi valori degli indici di efficienza:

<i>Configurazione</i>	<b>Disponibilità</b>	<b>Prestazioni</b>	<b>Qualità</b>	<b>OEE</b>
Originale con Ridondanze	98,81%	100%	99,97%	98,77%
Senza Ridondanze	98,32%	100%	99,97%	98,28%

Tabella 5.1: Confronto Efficienza tra diverse configurazioni Linea B

Dai valori in Tabella 5.1 sembra che l’inserimento di macchine in parallelo non porti un risultato così marcato in termini di efficienza. Ricordando però che l’OEE considera la configurazione utilizzata come configurazione ideale, si capisce che non basta analizzare questi dati per vedere il reale miglioramento introdotto dalle ridondanze.

Passando ora a considerare il rapporto tra la produzione reale ottenibile attraverso la configurazione scelta e quella che teoricamente di dovrebbe avere per rispettare i requisiti del progetto ( definito **OEE\***), è impossibile non notare come la scelta di avere alcune unità in parallelo risulti irrinunciabile.

<i>Configurazione</i>	<b>Produzione Richiesta Oraria [pz]</b>	<b>Produzione Teorica Oraria [pz]</b>	<b>Produzione Reale Oraria [pz]</b>	<b>OEE*</b>
Originale con Ridondanze	5142	5142	5079	98,77%
Senza Ridondanze	5142	2500	2447	45,05%

Tabella 5.2: Confronto Produttività tra diverse configurazioni Linea B

Come noto la disponibilità di un linea può essere migliorata dall’introduzione di un buffer. Dimensionare e posizionare correttamente questo elemento influisce in modo determinante sui valori di efficienza che si possono raggiungere. In Figura 5.2 vengono riportati risultati ottenibili dall’inserimento di un buffer di capacità 18 o 36 pezzi<sup>2</sup> nelle diverse posizioni della linea di assemblaggio.

<sup>2</sup>Si sono scelte queste dimensioni perché corrispondono al numero di mandrini di 1 o 2 macchine bobinatrici

## 5.1. Confronto Tra Diverse Configurazioni

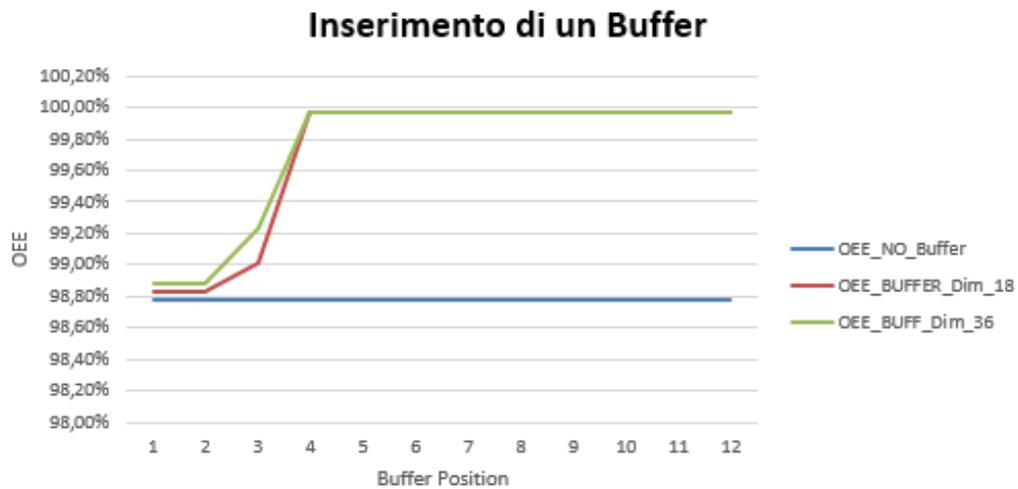


Figura 5.2: Dimensionamento e Posizionamento Buffer

### 5.1.1 Inserimento di Guasti Casuali e Ritardi degli Operatori

Quelle descritte finora corrispondono alle condizioni ideali di funzionamento, tuttavia durante l'utilizzo reale della linea possono presentarsi eventi che vanno a modificarne lo stato. Guasti o ritardi degli operatori sono due fattori tipicamente presenti che influenzano l'efficienza della linea.

Attraverso un semplice algoritmo di generazione di numeri casuali è stato possibile inserire all'interno del modello questi fattori e veder come influenzano i risultati di efficienza e produttività.

Braking_Wires			Operator_Delay [min]		
m1	m2	m3	m1	m2	m3
			4		
			5		
2	6		1	1	
			2	3	
			1		
			4		
			2	3	
			4		
			4		
			4		
			3		
			5		
			4		
			3		

Figura 5.3: Simulazione di Rottura Fili e Ritardi Casuali

Considerando la configurazione originale della linea e inserendo i guasti ed i tempi di ritardo presenti in Figura 5.3 vengono raggiunti i seguenti risultati:

Disponibilità	Prestazioni	Qualità	OEE	OEE*
98,16%	99,98%	99,97%	98,11%	46,33%

Tabella 5.3: Efficienza Considerando Ritardi e Guasti

Prima di proseguire è opportuno spiegare come la rottura di un filo durante la lavorazione influenzi l'efficienza dell'unità di bobinatura. La macchina bobinatrice inserita in questa linea è costituita da 18 mandrini rotanti ( l'unità consente quindi la lavorazione di 36 bobine contemporaneamente) che funzionano indipendentemente l'uno dall'altro. Una macchina è costretta a fermarsi solo se verifica il guasto di almeno 5 mandrini/fili, in caso contrario la lavorazione continua con un ritmo ridotto rispetto allo standard. Nel caso dei dati considerati quindi si verifica la condizione in cui la macchina bobinatrice 2, considerando la rottura di 6 fili, si ferma, mentre la macchina 1 continua a lavorare sfruttando però solo 16 mandrini. Sapendo che il tempo ciclo di riferimento, definito dal progetto per rispettare le richieste del cliente<sup>3</sup>, è di  $0,7[\frac{s}{pz}]$ , nelle condizioni attuali il tempo ciclo raggiungibile risulta  $T_{c_{on,fig}} = 1,58[\frac{s}{pz}]$  che corrisponde ad una riduzione del ritmo produttivo che passa dai  $5142[\frac{pz}{h}]$  dello standard ai  $2285[\frac{pz}{h}]$  attuali.

Viene ora presentata una diversa simulazione, molto semplificata, dell'andamento dell'efficienza della linea durante una settimana di attività. Noto che la linea è pensata per funzionare 24 ore su 24, considerando quindi tre turni di lavoro da 8 ore per 5 giorni a settimana, vengono introdotti, ancora una volta, ritardi degli operatori e guasti casuali su tutte le unità presenti.

<sup>3</sup>Considerando quindi il funzionamento di tutti i 36 mandrini a disposizione

## 5.1. Confronto Tra Diverse Configurazioni

La simulazione si basa su uno script Visual Basic che descrive il comportamento della linea definendo che:

- il fermo totale della linea avviene nel caso di guasto completo di un unità;
- il fermo completo dell'unità si verifica se il numero di guasti che avvengono, nel periodo di riferimento, è uguale al numero di macchine di cui è costituita;
- la riduzione di produttività si verifica se il numero di guasti di un'unità è inferiore al numero di macchine presenti nella stessa.

In Figura 5.4 è possibile vedere quanto appena descritto in un esempio, parte del modello di simulazione. Nella Figura 5.5 sono invece riportati i risultati della simulazione effettuata, da cui è possibile vedere come l'andamento dell'OEE\* segua l'andamento dell'indice di prestazioni.

Unit Description		Period							Period					OEE*
Name	N Units	m1	m2	m3	T_rip	Tc	N/fault	N/stop	A	Rv	Rq	R		
Unità1	1	1	1	1	2	0,7	1	1	1	0,98	0,9804	1	0,9932	0,9608
Unità2	1	1	0	1	5	0,7	1	1	0,9466667	0,9495	1	0,993	0,8988	
Unità3	2	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1
Unità4	2	1	1	0	6	0,7	2	1	0,9466667	0,939	0,9999	0,9965	0,851	
Unità5	1	1	1	0	4	0,7	1	1	0,96	0,9616	1	0,9931	0,9231	
Unità6	1	0	1	1	2	0,7	0	0	1	1	1	1	1	1
Unità7	2	1	1	1	6	0,7	2	1	0,94	0,8872	0,9999	0,9965	0,8339	
Unità8	1	0	1	1	2	0,7	0	0	1	1	1	1	1	1
Unità9	1	0	1	1	1	0,7	0	0	1	1	1	1	1	1
Unità10	1	0	0	1	2	0,7	0	0	1	1	1	1	1	1
Unità11	1	0	0	0	6	0,7	0	0	1	1	1	1	1	1
Unità12	1	0	0	0	1	0,7	0	0	1	1	1	1	1	1
Unità13	1	0	0	1	2	0,7	0	0	1	1	1	1	1	1
Unità14	1	0	0	1	1	0,7	0	0	1	1	1	1	1	1

Unit Description		Period							Period					OEE*
Name	N Units	m1	m2	m3	T_rip	Tc	N/fault	N/stop	A	Rv	Rq	R		
Unità1	0	1	1	1	4	0,7	0	0	1	1	1	1	1	1
Unità2	0	1	1	0	1	5	0,7	1	1	0,96	0,9616	1	0,9931	0,9231
Unità3	0	2	1	0	1	3	1,4	1	0	1	0,8867	1	0,9932	0,9866
Unità4	0	2	1	1	0	4	0,7	2	1	0,9533333	0,911	0,9999	0,9965	0,8684
Unità5	0	1	0	0	0	1	0,7	0	0	1	1	1	1	1
Unità6	0	1	1	0	0	6	0,7	1	1	0,9466667	0,9495	1	0,993	0,8988
Unità7	0	2	0	1	0	1	1,4	1	0	1	0,8867	1	0,9932	0,9866
Unità8	0	1	1	1	1	2	0,7	1	1	0,9733333	0,974	1	0,9932	0,948
Unità9	0	1	1	1	0	1	0,7	1	1	0,9733333	0,974	1	0,9932	0,948
Unità10	0	1	0	0	1	3	0,7	0	0	1	1	1	1	1
Unità11	0	1	1	1	1	5	0,7	1	1	0,9533333	0,9555	1	0,993	0,9109
Unità12	0	1	1	1	0	1	0,7	1	1	0,9866667	0,9868	1	0,9932	0,9736
Unità13	0	1	0	0	4	0,7	0	0	1	1	1	1	1	1
Unità14	0	1	0	0	1	2	0,7	0	0	1	1	1	1	1

Figura 5.4: Simulazione Efficienza della Produzione Settimanale - Dati  
 La figura mostra, in due diversi periodi di riferimento della durata di 150 min l'uno, come il presentarsi di guasti e ritardi va a influenzare l'efficienza delle unità.

Da ultimo si è sviluppata un'ulteriore funzione che riuscisse a simulare, in modo più realistico, il comportamento al guasto della bobinatrice (la cui risposta ai guasti è stata spiegata nel Capitolo 4).

## 5.1. Confronto Tra Diverse Configurazioni

Per gestire questa simulazione, e dare la possibilità di applicarla anche ad altre linee, è stata predisposta l'interfaccia mostrata in Figura 5.7. In Figura 5.6 si possono vedere come i diversi indici evolvano nel tempo a fronte dei guasti che si verificano.

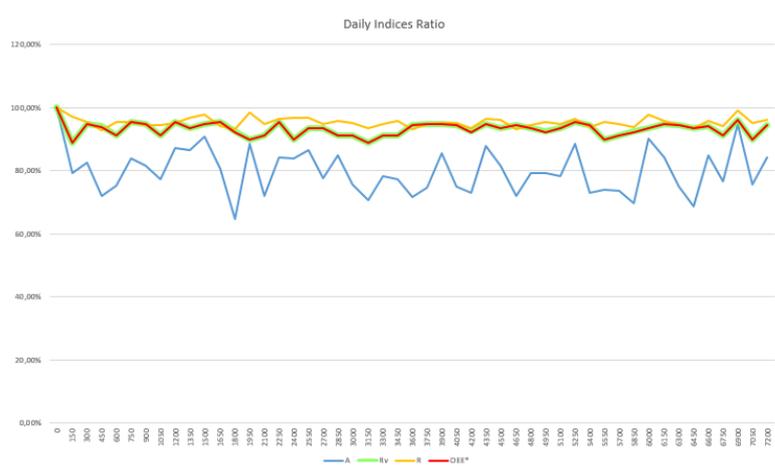


Figura 5.5: Simulazione Efficienza della Produzione Settimanale - Andamento Indici

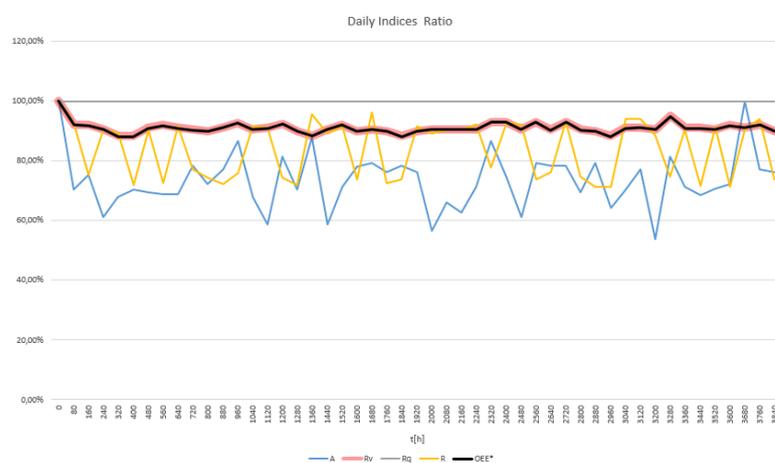


Figura 5.6: Simulazione più realistica dell'Efficienza della Produzione Settimanale - Andamento Indici

## 5.2. Simulazione Manutenzione

Simulation Control Pannel			
Simulation about a just Analized Line		Completely Random Simulation	
Which Line do you want consider?		Do you want a random value for all data?	
K08890		No	
Data Generation			
Tc_project		0,7 [s/pz]	
N. Unit		15	
N. Testing or Working Unit		9	
N. of spindle of each winding machine		18	
Max N. of Braking wire to stop the production		5	
Unit	Description	N. Machine T_repair	
unit1	Cones Loading	1	4
unit2	Shuttle	1	3
unit3	Winding Machine	2	2
unit4	Welding Machine	2	1
unit5	Camera Welding Test	1	5
unit6	Camera Winding Test	1	3
unit7	Bending Pin	1	1
unit8	Bending Test	1	2
unit9	Ohmic Test	1	5
unit10	Marking	1	3
unit11	Palletizer	1	1
unit12	Tools Cleaning	1	5
unit13	Cleaning Test	1	1

Figura 5.7: Simulazione più realistica dell'Efficienza della Produzione Settimanale - Interfaccia

## 5.2 Simulazione Manutenzione

Si ha già avuto modo di considerare l'importanza della manutenzione all'interno dell'analisi di efficienza di un impianto e di come l'attivazione di queste operazioni possa essere impiegata per ridurre il presentarsi dei guasti.

Il tipo di manutenzione implementato nelle simulazioni è quello che è stato definito : *Manutenzione Condizionata ( CBM )*. La condizione scelta affinché questa possa essere attivata è l'abbassamento dell'affidabilità al di sotto di una soglia fissata al 80%.

Di seguito verranno presentati i risultati per la definizione di un possibile piano di manutenzione sulla base di diversi tipi di dato. In Figura 5.8 è riportato il caso in cui l'affidabilità venga calcolata attraverso i tassi di guasto dei componenti considerando tutti dati che si hanno a disposizione e quindi rappresenta un piano che potrebbe essere utilizzato nel normale funzionamento dell'impianto.

In alternativa, qualora non si potesse disporre di tutti i dati, una possibile pianificazione potrebbe essere fatta secondo quelli che sono i tassi di guasto derivati dalla vita utile dei componenti (vedi Figura 5.9).

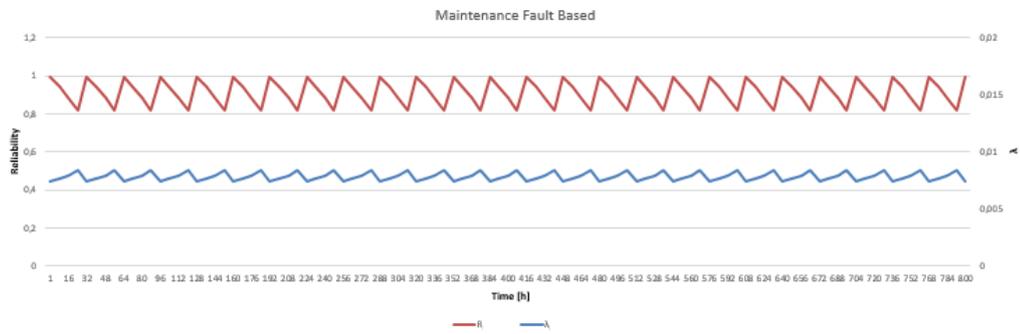


Figura 5.8: Manutenzione Condizionata - Fault Based



Figura 5.9: Manutenzione Condizionata - Life Based

Confrontando i due piani è possibile notare che la distanza tra le operazioni di manutenzione basata sui guasti è di 32 ore, molto inferiore (ma più realistica), rispetto al caso di pianificazione fatta sulla base delle vite dei componenti di 320 ore.



# Capitolo 6

## Conclusioni

Avere a disposizione uno strumento che permette di ricavare una stima dell'efficienza complessiva di una linea di assemblaggio già in fase di progettazione risulta essere molto utile.

Poter confrontare diverse configurazioni e scegliere i componenti più adatti per la costruzione delle macchine consente di poter verificare, e al tempo stesso giustificare, i costi che la realizzazione dell'impianto richiede.

Il modello che è stato sviluppato è in grado di soddisfare entrambe le funzionalità e può quindi essere considerato utile al fine di trovare la miglior configurazione possibile per risolvere un determinato problema.

Volendo riassumere i risultati ottenuti nei capitoli precedenti si può affermare che:

- i) Il modello è in grado di confrontare diverse configurazioni dell'impianto e fornire i livelli di efficienza raggiungibili;
- ii) Il modello può essere impiegato per definire un possibile piano di manutenzione, utile per migliorare l'efficienza dell'impianto;
- iii) Il modello può essere impiegato in fase di analisi dell'efficienza per ricavare i parametri utili per il calcolo dell'OEE (indice standard per l'efficienza degli impianti);
- iv) il modello può essere utilizzato per la stima dell'efficienza di un impianto sulla base dei dati a disposizione.

Rispetto ai risultati ottenuti dai vari impieghi del modello è giusto specificare che: mentre i valori ottenuti dal confronto delle diverse configurazioni

---

possono essere considerati corretti ed è quindi possibile definire quale sia la miglior configurazione della linea, l'impiego del modello per la stima dell'efficienza è fortemente condizionato dalla quantità e qualità dei dati che si hanno a disposizione. Come viene detto nel capitolo 4 il calcolo dell'OEE sulla base dei soli dati di vita utile dei componenti non fornisce una stima precisa di quello che sarà il valore puntuale dell'efficienza complessiva della linea una volta che questa verrà realizzata.

D'altra parte avere a disposizione solo i dati provenienti dai dati di collaudo non garantisce che il valore dell'efficienza ottenuto sia perfettamente coincidente con il valore reale, perché non tutti i guasti possono verificarsi nella fase di collaudo e quindi è sempre presente una certa incertezza sul valore finale.

Dall'applicazione del modello, per quegli impianti di cui si avevano a disposizione i dati reali (utilizzando sia i dati provenienti dai collaudi, sia quelli relativi alla vita utile), si è potuto verificare che l'errore massimo commesso nella stima dell'efficienza si attesta intorno al 1 – 2%, mentre l'errore medio intorno allo 0,05%. Tuttavia nel caso di conoscenza parziale dei dati gli errori sono leggermente maggiori e rispettivamente del 3 – 5% e dello 0,5%.

Per quanto riguarda la possibilità inserimento di un buffer all'interno dei sistemi al fine incrementarne l'efficienza, questa risulta essere una funzionalità molto utile, ma non applicabile a tutti i tipi di impianto. La complessità di dimensione, forma e numero di parti da immagazzinare potrebbe infatti comportare costi troppo elevati rispetto ai benefici che l'aggiunta di questo componente introduce.

Dal punto di vista della produttività la possibilità di poter simulare il comportamento della linea permette di andare a verificare come eventuali ritardi e guasti influiscano sul risultato finale. Non da ultimo permette di visualizzare l'andamento della produttività per la durata del tempo di vita dell'impianto. Un esempio di questa ultima funzionalità è riportato in Figura 6.1. In questo modo è anche possibile prevedere quando andare a sostituire l'impianto perché l'usura dei componenti ha raggiunto un livello troppo elevato perché essi possano essere riparati<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup>In Figura 6.1 è presa come vita utile media dei componenti un periodo di 5 anni in cui dopo 4 anni iniziano a presentarsi i primi fenomeni di usura nei componenti



Figura 6.1: Simulazione Produzione

Infine l'interfaccia semplice e l'implementazione attraverso software Microsoft Excel rendono il modello facilmente utilizzabile anche da chi non ha una profonda conoscenza nel campo dell'efficienza delle macchine e degli impianti meccanici per l'assemblaggio.

Un dato di fatto è costituito dalla sempre maggior importanza che l'efficienza occupa nella progettazione e per la vendita di un impianto visto che permette, non solo una maggiore e migliore produttività, ma consente anche alle aziende produttrici ed utilizzatrici di essere più competitive nei rispettivi mercati di riferimento.

Non da ultimo un impianto efficiente, a fronte di un maggior investimento iniziale per l'analisi e la progettazione, permette un risparmio attraverso la pianificazione delle operazioni di manutenzione in modo da ridurre al minimo le conseguenze ed evitare, attraverso un monitoraggio continuo, il presentarsi di guasti importanti e prevedibili andando ad agire anticipatamente.

Visto il ruolo fondamentale che i guasti occupano nell'analisi dell'efficienza potrebbe essere utile inserire, all'interno delle linee, dei componenti (hardware o software) in grado di monitorarne lo stato durante il funzionamento e segnalare eventuali situazioni a rischio che potrebbero portare a

---

conseguenti blocchi delle unità o dell'intero sistema.

Inoltre il modello che si è realizzato potrebbe essere ulteriormente perfezionato andando a creare modelli più precisi delle diverse unità impiegando anche strumenti di analisi e test delle macchine diversi per estrarre il maggior numero di informazioni possibili.

# Bibliografia

- [1] Macchi Marco. Lezioni del corso di Impianti Industriali e Gestione della Produzione. Politecnico di Milano, A.A. 2012-13.
- [2] Zieger Valenina, Panizzolo Roberto Tesi:Analisi dell'efficienza produttiva all'interno si un percorso di miglioramento continuo : caso OMART. Tesi di laurea magistrale in Università degli studi di Padova, A.A. 2012-13.
- [3] Riozzi. Capitolo 3 : Teoria dell'Affidabilità. Laboratorio di Simulazione Industriale, Università degli studi di Modena e Reggio Emilia.
- [4] Prof Riccardo Meloni Capitolo 5 : Teoria dell'Affidabilità e Valutazione dei Rischi. Costo di Impianti Industriali, Laboratorio di Simulazione Industriale, Università degli studi di Modena e Reggio Emilia.
- [5] Spicciarelli Laura, Mugnaghi Marco, Bertocci Francesco. Modellazione e Simulazione dell'Affidabilità e Manutenibilità di una catena si produzione industriale: La linea 4 dello stabilimento Barilla in Melfi. Tesi di laurea magistrale in Università degli studi di Siena, A.A. 2012-13.
- [6] Pilloni Maria Teresa. Corso di Gestione Progettazione degli impianti Industriali. Università degli studi di Cagliari, A.A. 2014-15.
- [7] Concetti di Teoria dell'Affidabilità. IPSIA Ferrara.
- [8] Jingshan Li, Semyon M.Meerkow. Production System Engineering. Springer, 2009.
- [9] David O'Syllivan. Lesson on the unit 13:Automated Production Lines. NUI Galawey.
- [10] F.L.Härte. Efficiency Analysis of Packaging Lines. WBBM Report, University of Delft, 1997.

- [11] S. Prombapong, J.Kaewyu, N. Thanadulthaveedech e M. Matwang-sang. A buffer designed for mitigation downtime effect in an automated transfert line. *International Journal of Innovation, Management and Technology*, Vol 4, Febbraio 2013
- [12] Paggi Roberto, Diana Daniele, Muzi Francesco, Scardamaglia Paolo, Malentacchi Massimo. Analisi RAM di un sistema di confezionamento. *Manutenzione, Tecnica e Meccanica*, Aprile 2004.
- [13] Ierace Stefano Lezione di Affidabilità, Manutenibilità e Disponibilità. Università degli studi di Bergamo
- [14] Kannan Balaji Reliability/Availability of Manufacturing Cells and Transfer Lines Thesis to Graduate Faculty of Auburn University in partial fulfillment of the requirements for the Degree oa a Master of Science, Auburn Alabama, maggio 2011
- [15] S. Jack Hu, Kathryn E. Stecke e Robert Webbink Analysis of Various Assembly System Configuration with Respect to Quality and Productivity. University of Michigan , Marzo 1998, Revisione Maggio 2000.

# Sitografia

- [§1] Calcolo OEE. [www.leanproduction.com/oeo](http://www.leanproduction.com/oeo)
- [§2] Weibull Distribution. [www.reliawiki.org](http://www.reliawiki.org)
- [§3] Normativa UNI EN 13306. [www.scaroniconsulting.it/sc/manuali/manutenzione](http://www.scaroniconsulting.it/sc/manuali/manutenzione)
- [§4] Dispensa RBD. [www.reliabilityeducation.com](http://www.reliabilityeducation.com)
- [§5] Motor Life Time. [www.orientalmotor.com/support](http://www.orientalmotor.com/support)