

POLITECNICO DI TORINO



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA GESTIONALE
E DELLA PRODUZIONE

Corso di laurea magistrale
in Ingegneria Gestionale

Creazione di un Digital Twin per il dimensionamento energetico di una linea di lavorazione di alberi motore

Relatrice:
Prof.ssa Anna Corinna Cagliano

Co-Relatrice aziendale:
Patrizia Bucci

Candidata:
Martina d'Onofrio

Ottobre 2019

Ringraziamenti

Prima di lasciar spazio alla tesi, desidero ringraziare tutte le persone che hanno reso possibile la realizzazione di questo lavoro e che, in un modo o nell'altro, mi hanno sostenuta durante tutto il mio percorso universitario.

In primo luogo, vorrei ringraziare la professoressa Anna Corinna Cagliano che, con la sua grande precisione e immensa disponibilità, mi ha guidata al meglio nella realizzazione di questo progetto di tesi.

È doveroso, inoltre, ringraziare tutta la Sim.Tec. e, in particolare, Patrizia Bucci, non solo per avermi dato la possibilità di sviluppare un argomento legato all'energia e all'ambiente, per cui ho da sempre nutrito un grande interesse, ma anche per aver creduto in me e nelle mie potenzialità, introducendomi nel mondo del lavoro. Un grazie speciale anche a Giulia Bruno, per avermi fornito un prezioso aiuto nella realizzazione del progetto. L'esperienza lavorativa all'interno della Sim.Tec. è stata altamente formativa, dal punto di vista umano e professionale, e mi ha permesso di conoscere persone meravigliose con cui ho condiviso questo intenso percorso di crescita. Quindi grazie ai miei colleghi e amici, Maria Rosa, Ilaria, Stefano e Gabriele. Grazie perché con loro ho capito davvero cosa vuol dire essere una squadra ed affrontare insieme ogni difficoltà.

A questo punto, non posso fare a meno di ringraziare la mia famiglia che, anche se a chilometri di distanza, mi è sempre stata vicina e mi ha dato la forza di affrontare ogni situazione. Grazie a mia mamma perché, con il suo amore, mi ha insegnato a credere in me stessa e ad essere libera nelle scelte, appoggiando ogni mia decisione. Grazie a mia sorella Alice, perché con lei non potrò mai sentirmi sola. Grazie ai miei cugini Andrea, Giulio, Dorcas e Archange, che nonostante la lontananza, non mi hanno fatto mai mancare il loro amore. Grazie a Sonia, che è un po' una seconda mamma, sempre pronta ad ascoltarmi e a trovare una soluzione ad ogni problema. Grazie a Gigi, Giannunzio e Michela e a tutti i loro preziosi consigli. Grazie a nonna Lina e nonno Michele, per avermi cresciuta con i loro insegnamenti ed aver sempre creduto in me. Grazie a Pietro per ogni sua attenzione che mi ha riempito il cuore e per ogni momento passato insieme, perché con lui posso essere me stessa.

Grazie agli amici di sempre, Stella, Silvio, Federico, Michela e Riccardo, che hanno vissuto con me ogni secondo di questa esperienza, e a tutti gli altri che ho incontrato durante il mio percorso e che hanno contribuito, anche solo per un periodo, a renderlo unico.

Infine, grazie al posto in cui tutto ha avuto inizio, quella stanza 206 al secondo piano del collegio Einaudi, in cui sono racchiuse tutte le paure, le gioie e le emozioni di questi splendidi anni.

Indice

Introduzione	1
1 Gestione razionale dell'energia	5
1.1 Investimenti in efficienza energetica	5
1.2 Analisi del Life Cycle Cost	6
1.2.1 Calcolo dell'indice LCC	7
1.2.2 Influenza dei consumi energetici sull'LCC	11
1.3 Benefici dell'efficienza energetica	11
1.4 Valutazione dell'efficienza energetica	17
1.4.1 Efficienza energetica per un processo di lavorazione meccanica	19
1.5 Metodi di caratterizzazione energetica	26
1.6 Efficienza energetica e lean manufacturing	28
1.6.1 Contabilità energetica	35
1.7 Modelli di simulazione	37
1.7.1 Applicazioni della Discrete Event Simulation	39
1.7.2 Tecniche DES applicate ad un flusso di energia.	40
2 Integrazione e interconnessione	43
2.1 Industry 4.0	43
2.2 Dalle norme ISO al PLM	46
2.3 La simulazione nell'ingegneria della produzione	48
2.4 SimTec: Simulation Technologies	49
3 Caso studio	53
3.1 Analisi di un sistema	53
3.1.1 Simulazione ad eventi discreti: Plant Simulation	55
3.2 Metodologia di sviluppo del Digital Twin	61
3.3 Obiettivi dell'analisi	62
3.4 Dati di input del modello	64

3.4.1	Schema logico dell'impianto	65
3.4.2	Sistemi di movimentazione	67
3.4.3	Aspetti energetici del sistema	71
3.5	Creazione del Digital Twin	73
3.5.1	Modellazione delle stazioni di lavoro	73
3.5.2	Modellazione dei consumi energetici dei macchinari	75
3.5.3	Modellazione dei conveyors	77
3.5.4	Modellazione dei <i>gantries</i>	78
3.5.5	Gestione dei bivi	85
3.5.6	Scelta della stazione di destinazione	86
3.5.7	Modellazione dei consumi energetici dei gantries	86
3.6	Verifica e validazione del modello	94
3.7	Progettazione degli esperimenti	100
3.8	Analisi degli output	108
3.9	Considerazioni economiche sull'analisi energetica	117
4	Conclusioni	121
4.1	Benefici portati all'azienda dalla tesi	121
4.2	Limitazioni della tesi	123
4.3	Passi futuri	124
	Bibliografia	125

Introduzione

Il presente lavoro di tesi ha come obiettivo la progettazione di un Digital Twin relativo ad una linea di lavorazione di alberi motore, al fine di sviluppare una metodologia che, attraverso la simulazione, consenta l'analisi del flusso di energia elettrica dell'impianto. La simulazione, come tecnica di analisi dinamica di un processo produttivo, fornisce una panoramica complessiva delle interazioni di ogni singolo elemento all'interno del sistema. Il software di simulazione utilizzato per la creazione del modello virtuale è Tecnomatix Plant Simulation di Siemens Industry Software.

Proposito del primo capitolo è quello di effettuare una panoramica sulle tecniche di analisi dell'energia consumata in un processo produttivo e sugli impatti economici, ambientali e sociali derivanti da una sua gestione razionale. Sempre più le imprese sono interessate ad analizzare i consumi energetici dei propri impianti, nell'ottica di un miglioramento continuo e di un risparmio economico nel lungo periodo.

Una delle principali tecniche di valutazione di un impianto produttivo o, in generale, di un investimento, è il calcolo del Life Cycle Cost (LCC), che ne indica il costo complessivo generato durante la sua vita utile. Non esiste un modello generale per il calcolo dell'indice LCC, ma è importante stimarlo in maniera corretta per ridurre il rischio di incorrere in previsioni sbagliate. Tra le voci di costo principali e più difficili da stimare ci sono i costi operativi e i costi di manutenzione dell'impianto. I costi operativi sono legati principalmente ai vettori energetici necessari al processo produttivo. Per questo motivo, avere uno strumento che consenta di analizzare l'utilizzo di energia in tempo reale o di prevedere quello relativo ad un impianto ancora in progettazione, costituisce un grande vantaggio all'interno di un'economia caratterizzata da un sempre più marcato aumento dei prezzi dell'energia. Inoltre, il monitoraggio dei flussi energetici ha una grande influenza anche sui costi di manutenzione, in quanto la definizione dei profili energetici dei macchinari di lavorazione e dei sistemi di movimentazione, consente di identificare rapidamente eventuali guasti e fenomeni di usura connessi a delle perdite energetiche.

L'analisi della letteratura scientifica ha permesso di identificare diversi metodi esistenti per caratterizzare un sistema dal punto di vista energetico. Essi sono stati suddivisi in metodi statistici, che attraverso l'identificazione di energy drivers permettono la definizione di una curva di caratterizzazione energetica, metodi deterministici, che prevedono l'utilizzo di misure sperimentali per creare i profili energetici dei singoli macchinari, ed, infine, la simulazione, in cui viene creato un Digital Twin del sistema in esame. Quest'ultima, in generale, può essere considerata uno strumento utile al raggiungimento degli obiettivi di lean production.

Alla luce della letteratura esistente, nonostante si riscontrino numerosi metodi per l'analisi energetica degli impianti industriali, essi non sono mai applicati a realtà particolarmente complesse. La grande quantità di dati da gestire, infatti, impone molto spesso delle semplificazioni che, sebbene permettano di delineare una funzione che descriva i profili energetici dei diversi componenti dell'impianto, comunque non consentono di rappresentare completamente le relazioni di causa-effetto tra i componenti stessi. Da qui nasce il proposito della tesi di studiare, dal punto di vista energetico, un sistema complesso, caratterizzato da oltre cinquanta stazioni di lavoro (macchinari) e da molteplici sistemi di trasporto di diverso tipo e complessità. L'ingente quantità di dati che ne deriva, può essere gestita soltanto tramite un software di simulazione. L'analisi che si intende sviluppare acquista ancora più importanza all'interno di un panorama in cui entrano in gioco le politiche nazionali e internazionali, che si preoccupano di tematiche come il riscaldamento globale e la qualità dell'aria, i cui effetti irreversibili possono essere ridimensionati grazie ad una gestione consapevole dell'energia.

Come la Value Stream Map, la simulazione permette di visualizzare l'intero processo produttivo rappresentando flussi di materiali, informazioni ed energia. Essa può essere impiegata per monitorare lo stato attuale di un sistema, identificando i diversi sprechi energetici e definendo ipotetici scenari futuri, il cui obiettivo è proprio quello di eliminare tutti i consumi di energia che non costituiscono un valore aggiunto. La simulazione è, dunque, uno strumento predittivo, che supporta i processi decisionali, nell'ottica del miglioramento continuo, e permette la realizzazione di un Sistema di Gestione dell'Energia (SGE), in linea con quanto prescritto dalla norma ISO 50001. In particolare, la simulazione ad eventi discreti è la tecnica maggiormente utilizzata per comprendere ed analizzare sistemi complessi. Infatti, a differenza di una Value Stream Map, con la quale è possibile eseguire soltanto un'analisi statica dei processi, la Discrete Event Simulation (DES) consente di effettuare un'analisi dinamica, descrivendo la fitta rete di interazioni che si verificano tra i diversi componenti del sistema.

La tesi è stata realizzata all'interno della SimTec, impresa che opera nel campo dell'Industria 4.0 e che vanta un'ampia esperienza nelle tecniche di simulazione di flusso attraverso l'utilizzo dei software Product Lifecycle Management (PLM) forniti da Siemens. Il secondo capitolo si concentra, infatti, sull'azienda e sul panorama in cui essa opera, caratterizzato dai due concetti "chiave" di integrazione e interconnessione. Il software Plant Simulation funge proprio da strumento di integrazione, in quanto con esso è possibile creare, per ogni oggetto presente nel sistema, una sua rappresentazione virtuale che può acquisire dati, elaborarli e trasmetterli ad altri

elementi. Si viene a creare, così, un sistema di comunicazione ben strutturato che consente di scambiare informazioni in tempo reale, generando una rete intelligente di prodotti e risorse.

Il terzo capitolo descrive la realizzazione del Digital Twin dello scenario “to be” di un impianto che sarà oggetto di una riconversione per essere adattato alla produzione di tre tipi di alberi motore, denominati A, B1 e B2. Prima di implementare quest’importante modifica, l’azienda in esame vuole rendersi conto dell’effettiva fattibilità del progetto e del suo costo complessivo, per avere una maggiore consapevolezza del ritorno economico che sarà generato nel lungo periodo. Dunque, nell’ottica di una valutazione del LCC del sistema, l’obiettivo del modello di simulazione è quello di individuare, oltre al target produttivo, il consumo energetico totale del sistema. In particolare, si intende analizzare tre scenari, contraddistinti da un differente mix di produzione.

Sulla base degli obiettivi di simulazione, la cui chiarezza è fondamentale ai fini della determinazione del giusto livello di dettaglio con cui si vuole costruire il modello, è stata effettuata un’accurata raccolta dei dati di input, cioè di tutte quelle informazioni relative al layout del sistema, alla dinamica del flusso produttivo, alle stazioni di lavoro, ai sistemi di trasporto e alle varie procedure operative. In seguito, è stato possibile procedere alla costruzione vera e propria del Digital Twin, modellizzando i macchinari ed i sistemi di movimentazione (nastri trasportatori e gantries) presenti nell’impianto e, infine, stabilendo le logiche di interazione tra di essi e i metodi di calcolo dei consumi energetici relativi. Se per determinare i profili energetici dei macchinari e dei nastri trasportatori sono state inserite le potenze medie erogate nei diversi stati da essi attraversati durante la simulazione (*working, setting-up, operational, failed, standby* e *off*), per i gantries sono state definite equazioni dettate da leggi fisiche che descrivono il consumo di energia associato ad ogni singola movimentazione. Per di più Plant Simulation fornisce la possibilità di inserire elementi stocastici, come i guasti dei macchinari e il conseguente tempo di riparazione degli stessi, entrambi associati a precise distribuzioni di probabilità.

In seguito alla verifica e alla validazione del Digital Twin, effettuate con l’aiuto del personale esperto in materia del processo produttivo in esame, è stato possibile eseguire degli esperimenti, relativi ai tre scenari analizzati, che permettessero di comprendere, oltre ai profili di carico di macchinari e sistemi di movimentazione, quale fosse il consumo energetico orario complessivo del sistema. Come si vedrà, dall’analisi è emerso che il secondo scenario, con un consumo annuale di circa 394 MWh, è quello meno dispendioso. Il primo e il terzo scenario sono, invece, contraddistinti rispettivamente da un consumo energetico superiore del 7,2% e del 6,8%.

Oltre ai risultati numerici, l'output di simulazione è caratterizzato anche da grafici, come gli istogrammi dei consumi energetici inerenti ai diversi stati delle risorse, che hanno consentito di comprendere a fondo non solo il costo annuale associato alla potenza richiesta per il funzionamento dell'impianto, ma anche le differenti cause relative all'erogazione di energia elettrica, distinguendo tra i consumi *value added* (VA) e quelli *non-value added* (NVA).

In definitiva, il grande vantaggio generato dal Digital Twin è la possibilità di avere una visione generale dell'impianto, che permette di studiare l'effetto che il cambiamento di una variabile locale (ad esempio il tempo ciclo di una stazione di lavoro) ha sull'intero sistema. Inoltre, la grande flessibilità, di cui è stato dotato il modello, fornisce all'azienda la possibilità di analizzare con rapidità molteplici scenari produttivi, variando determinati parametri di input, e costituisce un importante strumento alla base di un Sistema di Gestione dell'Energia.

Capitolo 1

Gestione razionale dell'energia

Il primo capitolo ha lo scopo di illustrare i principali benefici derivanti da una gestione razionale dell'energia ed effettuare una panoramica sulle tecniche di valutazione dell'efficienza energetica e, in generale, del flusso di energia di un sistema di produzione. Tra le diverse tecniche descritte, il focus sarà posto sulla simulazione ad eventi discreti. Quest'ultima, grazie all'inserimento di equazioni che descrivono i comportamenti fisici di alcuni elementi del sistema, consente di rappresentare in maniera ottimale non solo sistemi discreti, in cui le variabili di stato cambiano in istanti di tempo separati in seguito a determinati eventi, ma anche sistemi continui (in cui le variabili di stato cambiano continuamente), come il flusso di energia di una linea di produzione di un impianto industriale.

1.1 Investimenti in efficienza energetica

L'andamento scostante del prezzo delle fonti fossili e il più accentuato aumento della richiesta di energia, fanno sì che la gestione dell'energia assuma un peso sempre maggiore in tutti i settori. Infatti, sebbene le città occupino solo il 3% della superficie terrestre, consumano il 75% delle risorse naturali e producono il 60-80% delle emissioni globali di gas serra, e, il loro impatto sarà maggiore all'aumentare della popolazione [1]. Aumentare l'efficienza delle risorse su scala urbana consentirebbe una soluzione più sostenibile dal punto di vista ambientale e contribuirebbe al passaggio verso un'economia a basse emissioni di carbonio. Il risparmio di energia è, infatti, spesso riconducibile in modo proporzionale ad un abbattimento delle emissioni in atmosfera di CO_2 , il gas maggiormente responsabile dell'effetto serra.

In quest'ottica è necessario che in tutti i settori si valutino investimenti per migliorare l'efficienza energetica. Il risparmio energetico non significa ridurre il potenziale produttivo di un'azienda o il comfort di un edificio, ma utilizzare le nuove

tecnologie disponibili, per ridurre i consumi energetici mantenendo lo stesso livello di benessere. La valutazione di molti investimenti in questa direzione ha un risultato economico positivo. È importante valutare sia i costi d’acquisto sia i costi di gestione di un impianto, poichè il costo delle nuove tecnologie potrebbe essere inferiore rispetto al relativo risparmio energetico nel medio e lungo periodo.

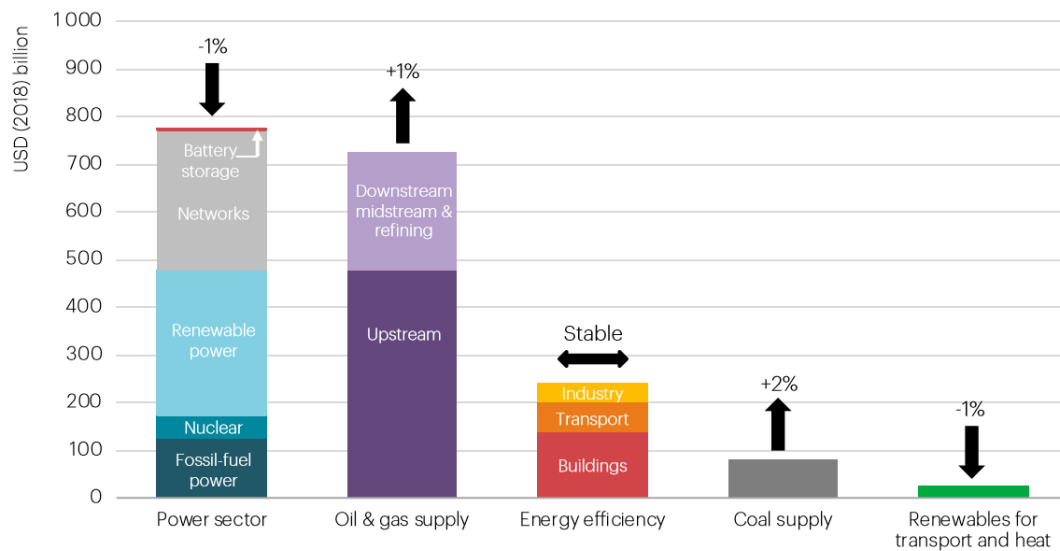


Figura 1.1: Investimenti globali nel settore dell’energia (in miliardi di dollari) nel 2018, con confronto rispetto al 2017 [2]

Come si nota nella Figura 1.1, gli investimenti totali e quelli in efficienza energetica sono rimasti relativamente stabili rispetto al 2017. In accordo con la crescente domanda di potenza elettrica, per il terzo anno consecutivo, nel 2018, il settore della generazione e della fornitura di energia elettrica (Power Sector) è stato quello caratterizzato dalla maggior parte degli investimenti, che hanno riguardato soprattutto le reti elettriche. Ha superato, così, i settori del petrolio e del gas naturale, con più di 760 miliardi rispetto agli 1,8 trilioni di dollari di investimenti totali [2].

1.2 Analisi del Life Cycle Cost

Le imprese, quando devono prendere delle decisioni su un investimento, non si basano solo sui costi iniziali di acquisto di un dispositivo o di realizzazione di un impianto, ma sui costi totali del ciclo di vita. La parte principale di questi costi è costituita dalle spese di funzionamento e manutenzione. Ad esempio, per la riparazione di un sistema o di un singolo prodotto, è necessario acquistare i pezzi di ricambio corrispondenti, sostenere i relativi costi di stoccaggio e pagare il team che

si occupa della sostituzione dei pezzi danneggiati con quelli nuovi [3]. In aggiunta a tutto ciò, ci sono delle perdite finanziarie relative al fatto che il funzionamento del sistema si sia bloccato a causa di un guasto. Tutte insieme queste voci di costo potrebbero essere maggiori del costo di acquisto del sistema.

A tal fine, è di fondamentale importanza l'analisi Life Cycle Cost (LCC), che costituisce il processo sistematico e analitico per valutare progetti differenti, con l'obiettivo di scegliere, tra le alternative, la soluzione migliore sulla base dell'aspetto economico [4]. La soluzione con LCC minore sarà quella più vantaggiosa. In molti casi, dal punto di vista economico, è preferibile un prodotto che, anche se è associato ad un maggior investimento iniziale, è più efficiente, cioè caratterizzato da un minor consumo energetico durante il suo utilizzo. Inoltre, negli ultimi anni sono state introdotte importanti innovazioni tecnologiche e, questa evoluzione, ha reso estremamente importante la scelta al momento dell'acquisto: il cliente può accettare la complessità di un impianto o di un singolo dispositivo solo se l'affidabilità dei componenti e il tempo di funzionamento sono elevati e la manutenzione richiesta è bassa [3]. Da questo punto di vista l'analisi dell'LCC diventa essenziale per supportare l'acquisizione ed ottimizzare il ciclo di vita nella fase operativa.

1.2.1 Calcolo dell'indice LCC

L'analisi del costo di vita di un prodotto può essere suddivisa in diverse fasi [5]:

1. Determinare la vita utile del prodotto
2. Stimare i costi coinvolti
3. Stimare il valore finale del prodotto al momento della fine del suo utilizzo
4. Attualizzare il valore del costo con il rispettivo tasso di sconto
5. Aggiungere il risultato degli step precedenti al costo di acquisto

La prima fase consiste nella determinazione dell'arco temporale in cui il componente verrà utilizzato. Spesso, se si considera un prodotto soggetto ad innovazione, è opportuno considerare un intervallo di tempo non troppo ampio, poiché la vita utile dell'impianto potrebbe essere breve e potrebbero essere necessarie modifiche che cambierebbero nettamente i risultati dell'analisi [5].

La seconda fase prevede la determinazione di tutti i costi del componente considerato, durante il suo intero ciclo di vita. Tali costi possono essere suddivisi in diverse categorie.

Costi di sviluppo del progetto [I]. Questi costi rappresentano l'investimento iniziale che può essere ammortizzato nel tempo (di solito su un orizzonte temporale di dieci anni) e che comprende il costo d'acquisto delle materie prime per la costruzione dell'impianto in questione, le spese relative alla manodopera iniziale, i costi amministrativi, i costi di trasporto e installazione e i costi di ricerca e sviluppo. Questi ultimi sono particolarmente difficili da stimare e di solito sono considerati come una percentuale degli altri costi [6].

Costi operativi [OC]. La principale voce di costo al loro interno è il costo relativo al consumo energetico legato al processo di produzione in esame, ma in essi rientrano anche i costi degli altri fluidi (aria e acqua), che insieme all'energia termica e a quella elettrica costituiscono i vettori energetici principali di un impianto. Tra le altre voci di costo troviamo il costo d'acquisto delle materie prime (incluso trasporto e movimentazione), i costi dovuti agli scarti di prodotti finiti difettosi, che non rispettano gli standard di qualità e, in generale, tutti i costi dovuti alle inefficienze dell'impianto (es. fermi macchina) [6].

Costo dei consumabili [C]. Sono costi legati all'acquisto di tutto ciò che è necessario al funzionamento dell'impianto o di un determinato componente (es. lubrificante, toner per stampante, ecc.).

Costo del personale [W]. E' identificato principalmente con il salario corrisposto ai lavoratori addetti all'impianto di produzione [6].

Costi di manutenzione [M]. Appartengono a tale voce tutti i costi riconducibili alla manutenzione sui dispositivi o sugli impianti di produzione in generale. Ad esempio tra di essi rientrano i costi relativi ai materiali di ricambio necessari per prevenire le fermate durante il periodo di attività dell'impianto, lasciando inalterata l'efficienza globale di linea. La pianificazione di una politica di controllo e manutenzione è fondamentale per ridurre il rischio di incorrere in delle perdite finanziarie dirette, connesse alle manutenzioni straordinarie, e indirette, connesse alla mancata produzione in un determinato lasso di tempo. L'efficacia e l'efficienza di tali politiche dipendono dalla capacità di ottimizzare la gestione dei pezzi di ricambio, il cui stock rappresenta per l'azienda una voce di costo elevata, poiché significa immobilizzare il capitale. Bisognerebbe determinare il volume ottimale dei pezzi di ricambio in modo da ridurre al minimo i costi operativi e i costi di produzione persi per l'indisponibilità dei diversi componenti del sistema [3].

Costi di dismissione e smaltimento [D]. Tali costi sono collegati allo smaltimento di rifiuti e scarti lungo il ciclo di vita del prodotto e alla dismissione dell'impianto al termine della sua vita utile. A tali costi vengono poi detratti gli eventuali materiali recuperati [6].

Purtroppo non esistono modelli generali per il calcolo delle diverse voci di costo, ma c'è una grande varietà di approcci. Dunque, fornire un'analisi LCC corretta non è un lavoro semplice. Inoltre, stimare il valore di un progetto nella fase iniziale, quando il grado di incertezza è ancora troppo ampio, è rischioso e può portare a delle previsioni sbagliate. Le difficoltà sono tante soprattutto se la decisione riguarda l'investimento in un sistema di produzione. Ovviamente un impianto flessibile, cioè che si adatti a varie esigenze e cambiamenti durante la sua vita, è una soluzione costosa.

Dunque, è necessario includere delle previsioni di mercato nel processo decisionale, per selezionare il giusto grado di flessibilità dell'impianto su cui si reputa opportuno investire [7]. Per esempio le fluttuazioni della domanda di mercato, data una configurazione di sistema, potrebbero indurre dei costi di riconfigurazione, che rappresentano costi di investimento aggiuntivi che si verificano durante la vita di un sistema di produzione [7]. Per tenere conto di tali costi, un meccanismo di analisi del LCC può essere basato sulla progettazione di una configurazione di riferimento, denominata configurazione di base, e su tutte le potenziali modifiche che possono essere apportate ad essa.

La terza fase dell'analisi si occupa di stimare qual è il valore residuo, detto Terminal Value (TV), cioè il valore del nostro impianto alla fine dell'arco di tempo considerato nell'analisi [5], che potrebbe coincidere con la fine della sua vita utile o con la sua vendita. Detto T l'ultimo periodo di tempo considerato nell'analisi, il Terminal Value (Formula 1.1) esprime il valore, attualizzato al periodo T, dei flussi di cassa operativi, relativi all'impianto considerato, previsti per tutto il tempo successivo all'orizzonte temporale stabilito nella prima fase.

$$TV = \sum_{t=T+1}^{\infty} \frac{FC_t}{(1+i)^t} \quad (1.1)$$

FC_t : flusso di cassa relativo al periodo t

i: tasso di sconto

T: ultimo periodo considerato del ciclo di vita dell'impianto

Un impianto flessibile, che alla fine della realizzazione di un determinato prodotto o servizio, può essere sfruttato per la produzione di un altro tipo di bene, avrà un valore residuo maggiore di quello di un impianto non flessibile che deve essere dismesso.

Dopo aver considerato tutti i componenti che influenzano l'LCC, si può procedere alla sua definizione. Il principio del calcolo dell'LCC è lo stesso del NPV (Net Present Value) [7], ossia il valore assunto dalla somma di tutti i flussi di cassa attesi del progetto, nell'istante in cui viene effettuata la valutazione. In questo caso i flussi di cassa sono soltanto costi. La quarta fase, infatti, prevede di calcolare il valore attuale netto di tutte le voci di costo considerate e del Terminal Value. A tal fine si deve determinare il tasso di sconto reale dato dall'equazione di Fisher (Formula 1.2).

$$r = \frac{1 + i}{1 + p} \quad (1.2)$$

r: tasso di sconto reale, fornito dalla Banca Centrale Europea

i: tasso di sconto nominale

p: tasso di inflazione

Nella quinta ed ultima fase, dato un orizzonte di tempo che inizia dal periodo t_0 ed è costituito da N periodi, si esegue la sommatoria dei valori attuali dei costi calcolati per ogni periodo t, e si sottrae a tale sommatoria il Terminal Value, definito precedentemente, attualizzando anch'esso alla data di valutazione dell'LCC [5], come mostrato nella 1.3.

$$LCC = \sum_{t=t_0}^T \left(\frac{I}{A} + OC + C + W + M \right) \cdot \left(\frac{1}{1 + r} \right)^t - \frac{TV}{(1 + r)^t} \quad (1.3)$$

È importante sottolineare che l'investimento iniziale può essere considerato come un costo iniziale al tempo t_0 (in questo caso non necessita di nessuna attualizzazione), oppure essere ammortizzato e quindi diviso in n parti (tante quanti sono gli anni su cui si distribuisce l'ammortamento), ognuna delle quali rientra in un periodo di tempo t. Nella formula riportata si considera quest'ultimo caso.

1.2.2 Influenza dei consumi energetici sull'LCC

Come visto nel Paragrafo 1.2.1, i costi operativi [OC] sono caratterizzati prevalentemente dai costi legati ai vettori energetici necessari per far funzionare un impianto. Analizzare rapidamente l'effettivo utilizzo di energia e, di conseguenza, avere il controllo dei costi operativi, diventano sempre più fattori critici all'interno di un'economia globale, contraddistinta dall'aumento dei prezzi dell'energia e dall'introduzione di normative ambientali sempre più stringenti. Per di più, una buona gestione dell'energia ha un'influenza positiva anche sull'altra grande componente dell'LCC, e cioè sui costi di manutenzione [M], nella misura in cui va a ridurre le perdite finanziarie connesse alla mancata produzione e gli interventi tecnici necessari per garantire il corretto funzionamento di un macchinario. Secondo Huang et al. [8] il monitoraggio energetico e le strategie di manutenzione sono due fattori altamente correlati: nel loro studio, si utilizzano i dati acquisiti dai sensori, applicati ai macchinari di un sistema produttivo, per costruire un modello di un sistema di lavorazione multi-fase e, infine, applicare un algoritmo genetico per trovare il risparmio energetico ottimale. Un buon monitoraggio dei flussi energetici, infatti, permette di comprendere immediatamente la presenza di eventuali perdite energetiche dovute a guasti oppure a fenomeni di usura dei macchinari, e aiuta a definire la cosiddetta manutenzione predittiva, cioè quella manutenzione che definisce quando intervenire per sostituire un componente, al fine di agire con tempestività senza incorrere nella rottura. In questo modo si possono ridurre gli interventi manutentivi programmati ed eseguiti ad intervalli predeterminati secondo la politica di manutenzione preventiva, per passare ad una politica più flessibile e sempre più personalizzata in base al tipo di dispositivo o macchinario in esame. Un'esempio a sostegno dei benefici che si possono ottenere tramite l'applicazione di questi principi, è lo studio condotto da Zhou e Yin [9], i quali, migliorando la progettazione della strategia di manutenzione attraverso l'analisi predittiva, hanno ricavato un piano di manutenzione ottimale per i vari componenti di un parco eolico offshore, che ha permesso di ridurre i costi annuali di manutenzione del 30%.

1.3 Benefici dell'efficienza energetica

L'efficienza energetica ha impatti economici, ambientali e sociali che vanno al di là del semplice risparmio di energia e costi. Dunque si deve ampliare la prospettiva e misurare i suoi effetti in molti diversi ambiti. Nella sua relazione annuale, l'International Energy Agency (IEA) ha evidenziato quindici campi in cui una migliore gestione dell'energia può apportare benefici non indifferenti (Figura 1.2).

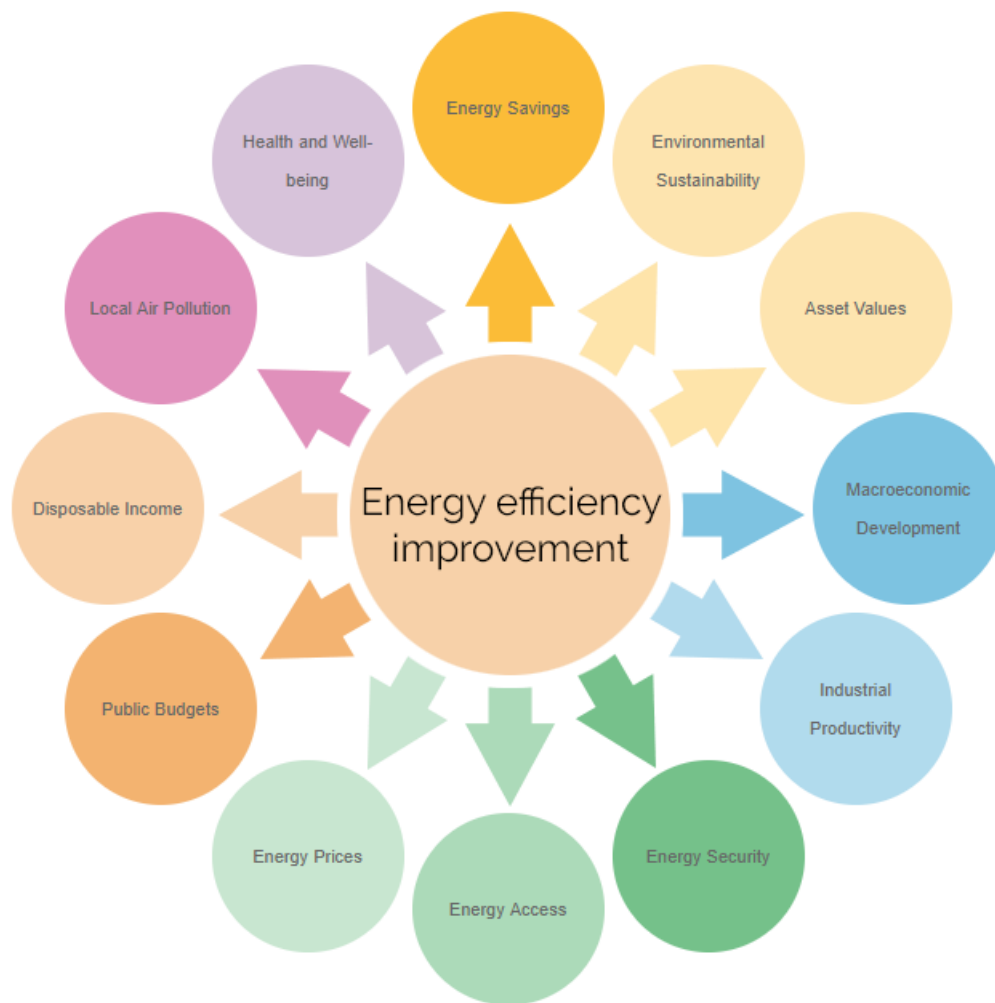


Figura 1.2: Benefici dell'efficienza energetica [10]

Tali benefici sono illustrati di seguito.

Risparmio Energetico. Si migliora l'efficienza energetica proprio quando si riduce la quantità di energia necessaria per fornire un determinato prodotto o servizio, mantenendo invariata la quantità di output prodotta. Globalmente l'efficienza energetica è migliorata di circa il 13% tra il 2000 e il 2017. La maggior parte di questo risparmio proviene dal settore industriale e degli edifici [11].

Sostenibilità ambientale. La riduzione dei consumi energetici ha un impatto positivo sul nostro pianeta per diversi motivi. Primo fra tutti la riduzione delle emissioni dei gas climalteranti, i cosiddetti GHG (Greenhouse Gases), tra i quali il più importante è il biossido di carbonio, o meglio conosciuto come anidride carbonica [10]. I principali altri gas che contribuiscono all'effetto serra sono il metano,

il protossido di azoto, l'esafluoruro di zolfo e i fluidi refrigeranti (clorofluorocarburi CFC, idroclorofluorocarburi HCFC, idrofluorocarburi HFC). Inoltre viene alleviata la pressione sulle riserve naturali di fonti energetiche attualmente conosciute ed economicamente sfruttabili, al fine di aumentare il più possibile la loro durata ed il tempo a disposizione per individuare nuovi giacimenti [10]. Per mitigare l'impatto che ha la crescita della domanda di materiali sulla domanda di energia, si deve cercare di offrire lo stesso prodotto o servizio con un utilizzo inferiore di materiali [12]. Infatti, molto spesso, la riduzione della quantità di materiali necessari per la produzione di un determinato dispositivo, porta anche ad un minore bisogno di energia. Le imprese, dunque, sono chiamate a modificare i propri prodotti e servizi, affinché abbiano un minor impatto ambientale nella fabbricazione e nell'utilizzo finale. Ciò comporta una revisione della "value chain" delle imprese e, di conseguenza, una migliore gestione di tutte le risorse, grazie soprattutto ad un uso intelligente delle nuove tecnologie. Rivedere prodotti, processi produttivi e filiera richiederà tempo, risorse e sviluppo di una cultura adeguata e sarà fondamentale un coinvolgimento maggiore e più attivo del personale. La diminuzione della domanda di materiali ad alta intensità energetica e, soprattutto, il riciclaggio dei prodotti, riducono la quantità di energia necessaria per il processo produttivo.

Qualità dell'aria. L'inquinamento atmosferico rappresenta un enorme rischio per la salute umana. L'utilizzo di energia costituisce la maggiore fonte di inquinamento nel mondo. È di fondamentale importanza cercare il più possibile di diminuire la concentrazione di agenti inquinanti nell'aria. I principali contaminanti, tenuti sotto controllo, sono l'ozono troposferico (O_3), il particolato (PM), il biossido di zolfo (SO_2), il monossido di carbonio (CO) e il biossido di azoto (NO_2). L'efficienza energetica può aiutare a ridurre le concentrazioni di tali agenti inquinanti. Ogni volta che un produttore emette sostanze inquinanti, genera un'esternalità negativa, influenzando il livello di vita e il benessere della società, che paga, quindi, un costo per il danno subito e per prendersi cura del problema causato dall'inquinamento; se le imprese produttrici non considerano questi costi nel decidere la quantità ottimale da produrre, il governo deve intervenire con dei regolamenti che possono prevedere limitazioni dell'inquinamento o tasse per le aziende. Infatti, di fronte a rigide normative ambientali, le imprese sostituiranno le loro attrezzature e introdurranno nuove tecnologie che garantiranno un minore impatto ambientale. Buone politiche ambientali dovrebbero far risparmiare una grande quantità di energia. Tuttavia, l'effetto della regolamentazione ambientale sul risparmio energetico è molto complesso. Molti ricercatori hanno studiato l'efficienza energetica dal punto di vista delle pre-

stazioni economiche di un sistema e ritengono che la regolamentazione ambientale abbia un impatto negativo sulla produttività dei fattori: ciò è contrario all'obiettivo di raggiungimento di un risparmio energetico mantenendo invariato l'output [13].

Accesso all'energia. È molto importante spingere verso un numero sempre maggiore di persone che possono accedere alle reti elettriche. In combinazione con l'espansione della rete e la generazione di energia pulita, l'efficienza energetica, riducendo il consumo inefficiente di elettricità, può aiutare a garantire l'erogazione di energia ad un numero maggiore di clienti, ad un costo inferiore rispetto a quello che si avrebbe aumentando soltanto la generazione. Molti studi dimostrano che il costo del risparmio energetico è di molto inferiore ai costi di approvvigionamento dell'energia e ai prezzi al dettaglio [14].

Salute e benessere. Le misure di efficienza energetica portano al raggiungimento di una buona salute fisica e psichica delle persone. I numerosi benefici da essa generati riguardano, ad esempio, la qualità dell'aria interna ed esterna, il livello di umidità, la temperatura e l'illuminazione degli ambienti. Tutti questi fattori hanno un grande impatto sia sul benessere mentale delle persone, sia su quello fisico: ad esempio, le persone che lavorano in edifici caratterizzati da un'elevata efficienza energetica hanno meno probabilità di soffrire di mal di testa, affaticamento e stress, e conseguono una maggiore produttività [10].

Reddito disponibile. L'efficienza energetica può aumentare il reddito di una famiglia o il profitto di un'impresa, riducendo l'importo delle bollette energetiche. Come si è già visto nel Paragrafo 1.1.2, grazie alla diminuzione dei consumi energetici, si possono ridurre i costi operativi e di manutenzione. Ad esempio, una lampadina a LED ha una durata maggiore e, quindi, deve essere sostituita meno frequentemente rispetto ad un altro tipo di lampadina meno innovativa [11].

Sviluppo macroeconomico. Se le imprese, le famiglie o il governo devono affrontare minori spese energetiche grazie alla maggiore efficienza, possono investire le risorse risparmiate in altre attività. Viene stimolata, così, non solo l'attività economica, ma anche l'occupazione, poiché sono necessarie nuove figure nel campo della gestione dell'energia. Ad esempio, sempre più aziende si dotano di Sistemi di Gestione dell'Energia (SGE), che vedono come protagonista la nuova figura dell'Energy Manager che si occupa di monitorare, analizzare e ottimizzare i flussi dei diversi vettori energetici all'interno di un'azienda, al fine di ottenere un miglio-

ramento continuo dell'efficienza. Tuttavia, la dinamica dell'impatto dell'efficienza sull'occupazione è una questione complessa e di difficile valutazione, perché, se da una parte nei nuovi ambiti che riguardano l'efficienza energetica si creano nuovi posti di lavoro, dall'altra la transizione verso prodotti più efficienti può avviare cambiamenti produttivi che riducono l'intensità del lavoro. È il caso dell'illuminazione a diodi a emissione luminosa (LED), che richiede meno impiegati per produrre prodotti che durano molto più a lungo degli altri tipi di lampade meno efficienti [11].

Bilancio pubblico. L'efficienza energetica può apportare dei benefici al bilancio pubblico, come affermato prima, per la diminuzione delle spese e per l'aumento delle entrate attraverso una maggiore attività economica [10]. Ci sono effetti positivi anche quando si creano nuovi posti di lavoro. Dunque i benefici ottenuti sul bilancio pubblico sono strettamente legati ai benefici macroeconomici.

I prezzi dell'energia. Con il miglioramento dell'efficienza energetica è necessaria meno energia per produrre un prodotto o fornire un servizio. Dunque si riduce la domanda di energia e, quindi, la pressione sulle risorse energetiche. Per di più, diminuisce la necessità di aggiungere nuove e costose centrali di generazione o di trasmissione. Tutti questi elementi fanno sì che i prezzi dell'energia si riducano. Ciò accade soprattutto se le attività di efficienza energetica sono sufficientemente diffuse e di grandi dimensioni. Col tempo, con l'aumento della globalizzazione, i mercati energetici potrebbero essere più strettamente collegati, e, a quel punto, le misure di efficienza energetica potrebbero ridurre i prezzi delle materie prime energetiche in tutti i Paesi. L'ottimizzazione dei consumi e, quindi, la maggiore disponibilità di energia primaria, svincola parzialmente l'impresa dal rischio di aumenti di prezzo delle materie prime energetiche e contestualmente può avere un effetto positivo sulla borsa dell'energia, stimolando la competizione di mercato [10]. Tuttavia, questo scenario positivo, non è così scontato: infatti, ad esempio, una diminuzione del prezzo del carburante, potrebbe portare le persone a guidare più chilometri l'anno, e, quindi, ad un aumento del suo consumo [10]. Ciò potrebbe avere ripercussioni su altri settori, come la diminuzione del tasso di utilizzo del trasporto pubblico.

Il valore degli asset. In un edificio, attraverso l'efficienza energetica, si può aumentare il comfort termico e luminoso, aumentare la sicurezza e la salute delle persone che vivono o lavorano all'interno, e ridurre le bollette energetiche e i costi operativi [10]. Tutti questi elementi che, come già visto, aumentano il benessere, vanno ad aumentare anche il valore di una proprietà. Questo aumento di valore si

traduce in un aumento della disponibilità a pagare di coloro che prendono in affitto o comprano un determinato spazio o edificio. Questo costituisce un incentivo per i proprietari degli asset ad investire in efficienza energetica. Inoltre, coloro che pagano un prezzo di affitto o di acquisto più alto, possono comunque beneficiare di bollette energetiche più basse. Anche le aziende possono aumentare il valore del loro patrimonio attraverso attrezzature ed impianti più efficienti ed innovativi, che migliorano la produttività e diminuiscono il grado di usura e i costi di manutenzione delle risorse che consumano energia.

La produttività dell'industria. Già si è visto come l'efficienza energetica comporta numerosi vantaggi, tra cui la riduzione dei costi operativi e di manutenzione e il miglioramento del funzionamento e dell'affidabilità del processo, e, conseguentemente, una riduzione dei tempi di fermo macchina, di spegnimento o guasto del sistema [8]. Tutto ciò si traduce in un aumento della produttività, in una maggiore generazione di valore e, quindi, in una più elevata competitività.

La sicurezza energetica. L'efficienza energetica, riducendo la domanda complessiva di energia, riduce la dipendenza, per i Paesi importatori, dalle importazioni di gas, petrolio e carbone e, dunque, aumenta la sicurezza energetica [10]. Ridurre le importazioni può avvantaggiare economicamente una Nazione.

Il concetto di avere molteplici vantaggi può essere applicato in differenti contesti, dai negoziati sugli obiettivi di efficienza energetica a livello UE, fino alle singole decisioni di investimento aziendale.

L'analisi costi-benefici (CBA) è stata la pietra miliare di molte discussioni sull'efficienza energetica. Essa confronta il denaro investito per risparmiare energia con i risparmi sui costi energetici nel tempo, portando semplicemente al calcolo del periodo di recupero dell'investimento (cioè del momento in cui i ricavi dovuti alla maggiore efficienza energetica abbiano completamente ripagato l'investimento iniziale) oppure effettuando calcoli più sofisticati che applicano tassi di sconto economici al valore dei flussi di cassa futuri rispetto alle spese attuali [9]. L'analisi costi-benefici comprende una serie di tecniche di valutazione dei progetti di investimento basate sulla misurazione e la comparazione di tutti i costi e i benefici direttamente e indirettamente ricollegabili ai progetti stessi. Una tra le tecniche è l'analisi del Life Cycle Cost, di cui si è ampiamente discusso nel Paragrafo 1.1.

Purtroppo non tutti gli impatti possono essere misurati a livello quantitativo, e, molto spesso, per quegli impatti che sono intangibili e difficili da valutare, si

utilizzano degli indicatori non robusti che possono portare a delle stime qualitative, che costituiscono più una valutazione soggettiva che una misura oggettiva della realtà. Questo problema si verifica quando si vogliono includere nell'analisi di un investimento costi e benefici che non sono monetizzabili, cioè difficili da tradurre in termini monetari.

Per questo motivo, l'approccio dei “benefici multipli”, non costituisce la base della maggior parte dei processi decisionali, che si basano, invece, esclusivamente su costi e benefici finanziari, come si è visto per il Life Cycle Cost. Ciò significa che, molti importanti benefici sociali, ambientali ed economici, sono esclusi dalle decisioni, a scapito della qualità delle decisioni stesse. È proprio qui che, molto spesso, entrano in gioco le politiche nazionali ed internazionali che si preoccupano di temi come l'occupazione, la salute e la qualità dell'aria. Questo è il caso, ad esempio, dell'Accordo di Parigi (Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici - UNFCCC, 2015), con il quale diversi Paesi si impegnano ad accelerare la riduzione delle emissioni dei gas ad effetto serra, partendo dal presupposto che il cambiamento climatico rappresenti una minaccia irreversibile per il pianeta [15].

Dunque, in conclusione, l'analisi del Life Cycle Cost potrebbe essere necessaria ma non sufficiente per valutare un investimento in efficienza energetica. Alla luce di ciò, nel diagramma della IEA in Figura 1.2, ogni petalo, che rappresenta un determinato beneficio, può essere considerato un punto di partenza, una motivazione, per un determinato stakeholder, di implementare il miglioramento continuo dell'efficienza energetica.

1.4 Valutazione dell'efficienza energetica

Tradizionalmente l'efficienza energetica è stata definita semplicemente come il rapporto tra l'energia utile prodotta da un processo e il suo input energetico, in cui l'output utile è generalmente rappresentato dai risultati termodinamici, fisici ed economici del processo in esame [16]. Questa definizione dell'efficienza non è altro che il rendimento termico del sistema.

$$\eta = \frac{E_{out}}{E_{in}} \quad (1.4)$$

La differenza tra energia in ingresso ed energia in uscita, corrisponde alle perdite energetiche del sistema. Questa definizione di efficienza può essere applicata ogniqualvolta l'energia in uscita dal sistema può essere calcolata, cioè non è trascurabile.

In caso contrario, non è possibile utilizzare il rendimento termico come indicatore dell'efficienza energetica. Tuttavia, in questo caso, è possibile ricorrere al consumo specifico di energia (Specific Energy Consumption, SEC), definito come il rapporto tra l'energia all'ingresso del sistema e l'uscita, misurata in unità fisiche prodotte (volume in uscita dal sistema) [17]. Tale definizione può essere applicata a tutti i processi, compresi quelli in cui può essere calcolato il rendimento termico.

$$SEC = \frac{E_{in}}{V} \quad (1.5)$$

È importante, a questo punto, operare una distinzione tra due tipi di processi.

- Processi in cui la fisica del processo fornisce precise indicazioni sul consumo dell'energia. Tali processi sono regolari nel loro comportamento energetico e, per essi, è più semplice determinare l'efficienza. Appartengono a questo gruppo tutti i processi basati sul calore, come il riscaldamento, la fusione e l'evaporazione, i processi chimici ed elettrochimici e i processi basati sul lavoro in senso fisico, come la compressione di fluidi comprimibili. Rientrano, all'interno di questa classe, anche gli edifici, che costituiscono dei veri e propri sistemi termodinamici caratterizzati da diverse potenze termiche in entrata o in uscita, che possono essere valutate tramite precise leggi fisiche [18].
- Processi in cui la fisica del processo fornisce scarse indicazioni sul consumo dell'energia, cioè l'efficienza è più difficile da determinare. Tra questi processi troviamo principalmente i processi di lavorazioni meccaniche, come il taglio o la miscelazione. Tali sistemi sono intesi come strutture formate da diversi dispositivi che funzionano in modo periodico, coordinato e sequenziale [19]. In questo caso è molto utile effettuare una caratterizzazione energetica dei singoli macchinari. La maggior parte delle strategie attuate finora, sono principalmente orientate a ridurre i tempi di inattività e il consumo totale di energia attraverso l'ottimizzazione di una particolare sequenza delle attività di lavorazione (*scheduling*) [20].

Nel Paragrafo 1.4.1 verrà approfondito lo studio dell'efficienza energetica di quest'ultimo tipo di processi e, in seguito, verrà fornita una panoramica dei metodi per la loro caratterizzazione dal punto di vista energetico.

1.4.1 Efficienza energetica per un processo di lavorazione meccanica

Il settore manifatturiero rappresenta, a livello mondiale, il 37% del consumo di energia primaria e, in Europa, il 40% del consumo di energia elettrica [17]. Per di più, di solito, l'efficienza energetica dei macchinari è bassa, inferiore al 30% [17], il che significa che esiste un significativo potenziale di miglioramento in questo campo.

Nel calcolo dell'efficienza energetica, per i sistemi di lavorazione, l'output utile si riferisce spesso all'energia di taglio, al volume di rimozione del materiale o al numero di parti prodotte. Una metodologia, che può essere utilizzata per valutare l'efficienza energetica di tali sistemi, è quella presentata da Tuo et al. [17] e basata sul concetto della *Virtual Part* (VP).

La VP è una parte equivalente immaginaria, che integra e semplifica il consumo di energia di tutte le possibili parti o entità lavorate dal sistema [17]. Se un'entità consuma la stessa quantità di energia di altre entità (dette parti) o se la sua curva di domanda di potenza è approssimativamente uguale a quella di altre entità, allora l'entità può essere considerata come la *parte equivalente*. Per comprendere meglio questo concetto si può osservare la Figura 1.3, in cui la curva di potenza della parte 3 è ottenuta dall'unione delle curve delle parti 1 e 2. La parte equivalente del consumo di energia deve essere progettata per poter rappresentare tutte le possibili entità prodotte dal sistema di lavorazione, perchè essa deve riflettere tutte le caratteristiche del consumo di energia del sistema di lavorazione in esame.

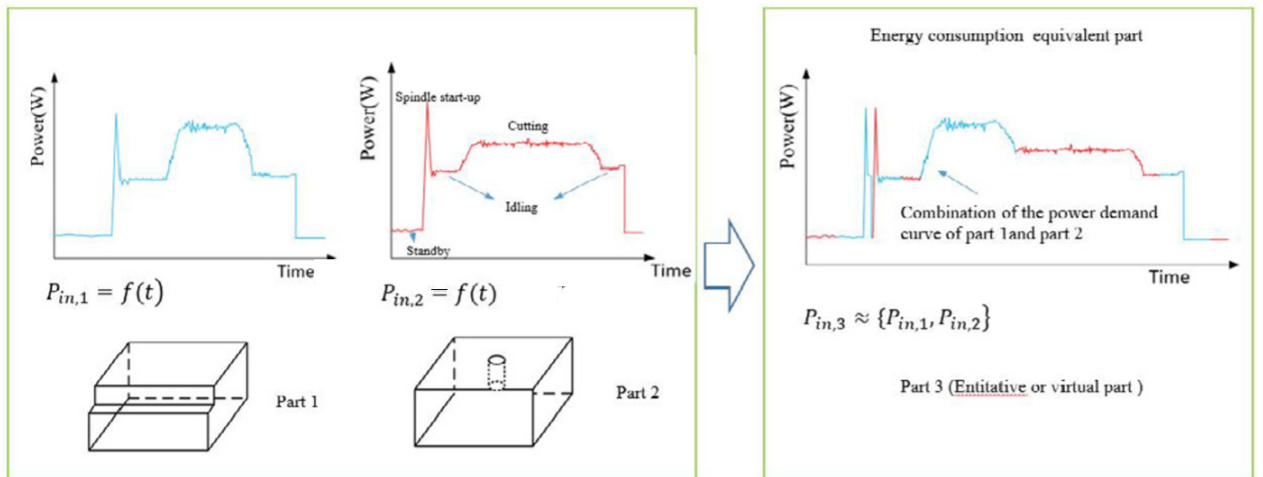


Figura 1.3: Profili della domanda di potenza delle parti 1, 2 e 3 [17]

Generalmente i processi di lavorazione, per la produzione di qualsiasi prodotto, sono divisi in molti sottoprocessi, costituiti dalle quattro fasi descritte di seguito [17].

1. La fase di standby del macchinario.
2. La fase di avvio del mandrino.
3. La fase di attesa (da quando viene avviato il mandrino fino all'inizio della lavorazione).
4. Il processo di lavorazione vera e propria del pezzo. Si considera in questo caso un processo di taglio.

Ogni macchinario, coinvolto in un processo produttivo, è formato da un insieme di diversi dispositivi che lavorano in modo sequenziale per elaborare un pezzo, durante un determinato periodo di tempo T , che corrisponde ad un ciclo operativo [19]. Dunque, il consumo di energia di un macchinario ha un andamento periodico, che si sviluppa passando per le quattro fasi sopraelencate [19].

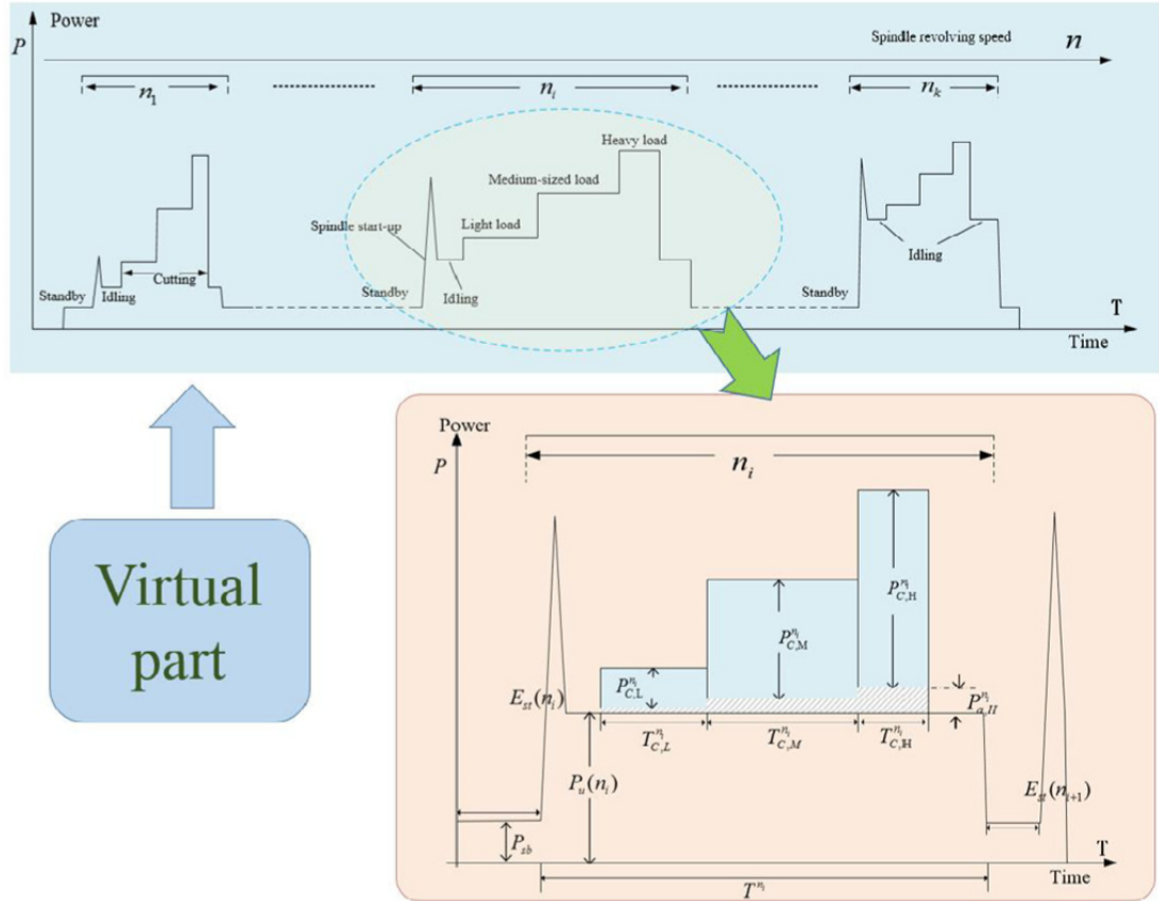


Figura 1.4: Rappresentazione della Virtual Part di un macchinario di lavorazione [17]

La ricerca suggerisce che la domanda di potenza è costante nel processo di standby (P_{sb}), mentre i consumi di energia nei processi di avvio ($E_{st}^{n_i}$) e di minimo del

mandrino ($P_u^{n_i}$), dipendono dalla velocità di rotazione del mandrino stesso [21]. La velocità di rotazione è un parametro chiave in tutti gli stati operativi, ad eccezione dello stato di standby. Nella fase di lavorazione vera e propria del pezzo (fase di taglio), invece, il consumo di energia è correlato alla potenza del carico [21]. I carichi nel processo virtuale sono, per semplificazione, divisi in tre categorie: leggero ($P_{C,L}^{n_i}$), medio ($P_{C,M}^{n_i}$) e pesante ($P_{C,H}^{n_i}$). Ogni carico comprende una rappresentazione della potenza di taglio e della perdita di potenza associata ($P_{a,L}^{n_i}$, $P_{a,M}^{n_i}$, $P_{a,H}^{n_i}$). La Figura 1.4 mostra la VP di una macchina utensile, discretizzata per ogni velocità di rotazione n_i del mandrino.

La parte equivalente (VP) deve includere, appunto, tutte le velocità di rotazione coinvolte nel processo.

Sulla base del metodo proposto della VP, può essere condotta una valutazione dell'efficienza energetica. È necessario, prima di tutto, definire gli indici di valutazione.

- Comprehensive Energy Consumption (CEC): consumo globale di energia
- Comprehensive Energy Utilization (CEU): utilizzo globale di energia

In generale il CEC, che si riferisce alla domanda totale di energia per la lavorazione della VP, si calcola come la somma delle energie totali necessarie rispettivamente per le fasi di standby, avvio, attesa e taglio del macchinario di lavorazione (Equazione 1.6). L'ultimo termine dell'equazione si riferisce alle perdite di carico complessive durante l'intero ciclo di lavorazione.

$$CEC = E_{sb} + E_{st} + E_u + E_c + E_a \quad (1.6)$$

Il CEU è dato dal rapporto tra l'energia consumata durante il tempo di processamento della parte virtuale e l'energia totale del processo virtuale, come illustrato nell'Equazione 1.7. Il valore riflette l'utilizzo medio di energia del sistema di lavorazione e fornisce, dunque, una stima dell'efficienza energetica del processo.

$$CEU = \frac{E_c}{CEC} \quad (1.7)$$

I dati necessari per calcolare gli indici possono essere divisi in dati correlati all'energia (ECD) e dati non correlati all'energia (EUD), come è mostrato in Figura 1.5.

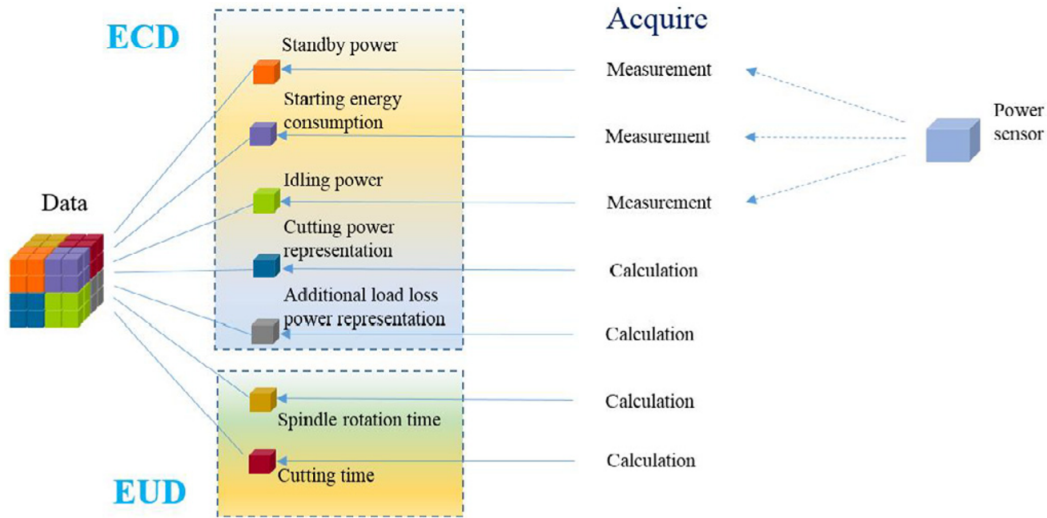


Figura 1.5: Dati necessari e metodologia di acquisizione corrispondente [17]

Di seguito si riporta una descrizione dei dati ECD e della loro metodologia di acquisizione [17].

Potenza di Standby [P_{sb}]. Si riferisce alla potenza media della procedura dall'accensione dell'interruttore di alimentazione principale all'avviamento del mandrino o del motore principale, e può essere misurata direttamente attraverso un sensore di potenza.

Consumo Iniziale di Energia [$E_{st}^{n_i}$]. Si riferisce al consumo di energia della procedura di avviamento del mandrino, che passa da 0 rpm (giri al minuto) ad un numero definito di rpm. Può essere rilevato tramite un sensore.

Potenza di Minimo [$P_u^{n_i}$]. È la potenza richiesta dal sistema di lavorazione quando il mandrino è in rotazione, ma il pezzo è in attesa di essere lavorato. Può essere misurata da un sensore di potenza.

Potenza di Taglio [$P_C^{n_i}$]. Questa potenza è correlata al tipo di carico. I carichi leggero, medio e pesante sono definiti rispettivamente in base agli intervalli di potenza 1.8, 1.9 e 1.10. Negli intervalli considerati, la potenza massima di carico $P_{ld}(n_i)$ viene, di solito, stimata sottraendo dalla potenza nominale P_e^s del motore

principale, la potenza di minimo $P_u^s(n_i)$, poiché il consumo di energia causato dal carico è determinato principalmente dal sistema di azionamento principale [21].

$$\left[0; \frac{1}{3}P_{ld}(n_i)\right] \quad (1.8)$$

$$\left(\frac{1}{3}P_{ld}(n_i); \frac{2}{3}P_{ld}(n_i)\right] \quad (1.9)$$

$$\left(\frac{2}{3}P_{ld}(n_i); P_{ld}(n_i)\right] \quad (1.10)$$

Dato che il carico, per ogni intervallo di potenza, ha una distribuzione continua uniforme, per ogni intervallo di carico si può scegliere la potenza media per rappresentare la potenza di carico corrispondente [17]. Ad esempio, per il carico leggero, la potenza sarà rappresentata dalla media aritmetica tra 0 e $\frac{1}{3}P_{ld}(n_i)$.

Considerando, inoltre, che la potenza di carico è data dalla somma della potenza di taglio e delle perdite di potenza, per un carico leggero si ottengono le Equazioni 1.11 e 1.12, in cui α è il coefficiente di perdita di carico, che stima la percentuale della potenza di carico che viene persa.

$$P_{ld}^L(n_i) = P_{c,L}(n_i) + P_{a,L}(n_i) \quad (1.11)$$

$$P_{a,L}(n_i) = \alpha P_{c,L}(n_i) \quad (1.12)$$

Lo stesso ragionamento può essere fatto per gli altri carichi.

Dunque, in definitiva, le potenze di taglio per un carico leggero, medio e pesante, possono essere rappresentate rispettivamente dalle Formule 1.13, 1.14 e 1.15.

$$P_{c,L}(n_i) = P_{ld}^L(n_i)(1 - \alpha) = \frac{1}{6}P_{ld}(n_i)(1 - \alpha) = \frac{1}{6}(P_e^s - P_u^s(n_i))(1 - \alpha) \quad (1.13)$$

$$P_{c,M}(n_i) = P_{ld}^M(n_i)(1 - \alpha) = \frac{1}{2}P_{ld}(n_i)(1 - \alpha) = \frac{1}{2}(P_e^s - P_u^s(n_i))(1 - \alpha) \quad (1.14)$$

$$P_{c,H}(n_i) = P_{ld}^H(n_i)(1 - \alpha) = \frac{5}{6}P_{ld}(n_i)(1 - \alpha) = \frac{5}{6}(P_e^s - P_u^s(n_i))(1 - \alpha) \quad (1.15)$$

Perdita di potenza $[P_a^{n_i}]$. Le perdite addizionali di potenza, correlate alla potenza di taglio, possono essere calcolate attraverso le seguenti equazioni.

$$P_{a,L}^{n_i} = \alpha P_{C,L}^{n_i} \quad (1.16)$$

$$P_{a,M}^{n_i} = \alpha P_{C,M}^{n_i} \quad (1.17)$$

$$P_{a,H}^{n_i} = \alpha P_{C,H}^{n_i} \quad (1.18)$$

Per rilevare le varie potenze descritte sin qui, sono necessari due sensori. Un primo sensore viene installato nel punto di ingresso del sistema di lavorazione per misurare la potenza di standby, il consumo di energia iniziale e la potenza di minimo. Un secondo sensore viene installato nel punto di ingresso del motore principale, per rilevare la potenza di minimo del motore principale, che serve per calcolare la potenza di taglio.

Ai dati ECD, segue la descrizione dei dati EUD e della loro metodologia di acquisizione [17].

Tempo di rotazione a diverse velocità (rpm) $[T^{n_i}]$. Il tempo di rotazione del mandrino, ad una determinata velocità di rotazione, è proporzionale alla corrispondente probabilità di utilizzo di quella velocità $f(n_i)$, che è a sua volta correlata al tipo di sistema di lavorazione. Se un sistema presenta troppe velocità di rotazione, non è pratico selezionarle tutte. Quindi si può pensare di dividere le velocità in più intervalli e, per ogni intervallo, scegliere una velocità di rotazione rappresentativa e una probabilità associata.

Tempo di taglio con carichi diversi $[T_{ld}^{n_i}]$. Allo stesso modo, il tempo di taglio con un determinato carico è correlato alla corrispondente probabilità di accadimento. Per determinare le diverse potenze di taglio e i tempi corrispondenti, è necessaria un'analisi dei dati storici disponibili (carte di processo). Si deve, poi, riconoscere a quale tipo di carico appartiene ogni potenza di taglio e sommare i tempi rispettivamente per ciascun tipo di carico. La probabilità di occorrenza di un determinato tipo di carico, è data dal rapporto tra il tempo di taglio del tipo corrispondente e il tempo totale. Dopo aver acquisito tale probabilità, il tempo di taglio, per i diversi tipi di carico (leggero, medio e pesante), può essere definito con le seguenti equazioni.

$$T_{C,L}^{n_i} = T_{ld}^{n_i} \cdot f_{C,L}^{n_i} \quad (1.19)$$

$$T_{C,M}^{n_i} = T_{ld}^{n_i} \cdot f_{C,M}^{n_i} \quad (1.20)$$

$$T_{C,H}^{n_i} = T_{ld}^{n_i} \cdot f_{C,H}^{n_i} \quad (1.21)$$

Dove $T_{ld}^{n_i}$ è il tempo di carico e $f_{C,L}^{n_i}$, $f_{C,M}^{n_i}$ e $f_{C,H}^{n_i}$ sono le probabilità di occorrenza dei rispettivi carichi. Partendo da queste equazioni soprastanti e dalle 1.13, 1.14 e 1.15, si possono ottenere i vari consumi energetici dovuti al taglio, per i diversi tipi di carico e per una determinata velocità di rotazione n_i .

$$E_{C,L}^{n_i} = P_{C,L}^{n_i} \cdot T_{ld}^{n_i} \cdot f_{C,L}^{n_i} \quad (1.22)$$

$$E_{C,M}^{n_i} = P_{C,M}^{n_i} \cdot T_{ld}^{n_i} \cdot f_{C,M}^{n_i} \quad (1.23)$$

$$E_{C,H}^{n_i} = P_{C,H}^{n_i} \cdot T_{ld}^{n_i} \cdot f_{C,H}^{n_i} \quad (1.24)$$

La potenza di taglio totale per una determinata velocità di rotazione n_i , si ottiene sommando le singole potenze di taglio per i tre tipi di carico (Equazione 1.25). Ugualmente si procede per calcolare la perdita di potenza complessiva, ad una determinata n_i (Equazione 1.26).

$$E_C^{n_i} = E_{C,L}^{n_i} + E_{C,M}^{n_i} + E_{C,H}^{n_i} \quad (1.25)$$

$$E_a^{n_i} = E_{a,L}^{n_i} + E_{a,M}^{n_i} + E_{a,H}^{n_i} \quad (1.26)$$

Per implementare tutti questi calcoli, di solito, viene utilizzato un software, che permette di ottenere i due indici CEC e CEU. Si può concludere che i cinque parametri E_{sb} , E_{st} , E_u , E_c , E_a necessari per l'equazione 1.6, si possono calcolare come segue.

- E_{sb} si ottiene integrando la potenza rispetto al tempo di standby, dopo che il sensore ha trasmesso i dati in tempo reale.
- E_{st} si ottiene integrando la potenza $P_{st}^{n_i}$ rispetto al tempo, per ogni velocità n_i , ed eseguendo la sommatoria di tutti i valori ottenuti.

- E_u si ottiene integrando la potenza $P_u^{n_i}$ rispetto al tempo, per ogni velocità n_i , ed eseguendo la sommatoria di tutti i valori ottenuti.
- E_c si ottiene dall'equazione 1.25, eseguendo la sommatoria per ogni n_i
- E_a si ottiene dall'equazione 1.26, eseguendo la sommatoria per ogni n_i

Gli indici utilizzati in questo studio [17], CEC e CEU, sono utili al fine di stabilire degli standard per valutare l'efficienza energetica dei sistemi di lavorazione durante la fase di utilizzo. Per ridurre il consumo di energia si può pensare sia di ridurre i tempi di inattività e la potenza di minimo, ottimizzando le strutture meccaniche del sistema di lavorazione, sia di ridurre le perdite di carico, attraverso l'ottimizzazione del sistema di trasmissione. In quest'ottica, il metodo di valutazione proposto, fornisce indicazioni anche per la progettazione di un sistema di lavorazione.

Il metodo della Virtual Part, rispetto ad altri metodi esistenti, è più accurato, poichè considera gli effetti dei diversi pezzi prodotti dal sistema sul consumo di energia e supera l'ostacolo di dover progettare una *parte* di riferimento.

1.5 Metodi di caratterizzazione energetica

Se si vuole caratterizzare un sistema dal punto di vista dei consumi energetici, si possono utilizzare metodi differenti.

Metodo statistico. Questo metodo consente, attraverso una regressione lineare o non lineare, semplice o multipla, di trovare un modello matematico, una funzione, che consenta di stimare i consumi attesi di un determinato sistema. Tale metodo prevede di identificare quali sono gli Energy Drivers, cioè le variabili che influenzano i consumi energetici di un sistema [22]. Una volta individuate, si può procedere alla raccolta di dati storici che permettono di effettuare una regressione ed individuare la curva di caratterizzazione energetica. Il metodo statistico ha, però, dei limiti, nel senso che, anche se ci consente di misurare le prestazioni energetiche di un sistema o un processo, non ci dà informazioni sul da farsi per poter migliorare l'efficienza [22]. Questo accade soprattutto per i processi complessi, in cui ogni macchinario utilizza l'energia in modo molto diverso. Inoltre, come visto nel Paragrafo 1.3, ci sono dei processi per cui la fisica non riesce a spiegare il perchè dei consumi energetici misurati. Un'esempio di applicazione di tale metodo è lo studio condotto da Yang et al. [22] che, attraverso un modello di regressione statistica, stima i consumi energetici che si verificano durante il trattamento delle acque reflue.

Metodo deterministico. Per superare i limiti del metodo statistico, si può adottare il metodo deterministico, che prevede la caratterizzazione energetica di tutti i macchinari di un impianto, utilizzando misure sperimentali dei consumi energetici. Tale metodo è più costoso di quello statistico, perchè richiede più strumenti tecnologici, come i sensori di rilevamento della potenza per ogni macchinario, ed anche personale con competenze specialistiche per la misura e l'analisi dei dati. Attraverso la conoscenza degli assorbimenti energetici delle singole macchine è possibile creare un profilo energetico per ogni macchinario, non solo per prevedere i consumi energetici, ma anche per individuare possibili miglioramenti. I contatori intelligenti (smart meters) generano una quantità enorme di dati sul consumo di energia [23]: il metodo adottato da Khan et al. [23] prevede quattro fasi, cioè il clustering dei dati, lo smoothing e la linearizzazione delle curve, l'ottimizzazione delle curve lineari ed infine la classificazione energetica per la modellazione del carico stocastico.

Simulazione. Quest'ultimo metodo prevede la creazione di un Digital Twin del sistema che si vuole esaminare, cioè un modello digitale che riproduca il sistema reale. Questo metodo permette, sia in fase di progettazione sia in fase di utilizzo di un impianto, di verificarne il comportamento, confrontandolo con quello reale. Si possono, dunque, realizzare esperimenti diversi, ognuno rappresentante uno scenario ipotetico, al fine di scegliere l'alternativa migliore [24]. Un modello di simulazione può rappresentare con precisione il profilo di consumo dei diversi dispositivi che compongono il sistema e che sono caratterizzati da una domanda di elettricità variabile [25]. La simulazione consente non solo di tenere sotto controllo un aspetto del sistema, come può essere, appunto, l'aspetto energetico, ma anche di valutare il sistema nella sua totalità, ottimizzando il flusso dei materiali, l'impiego delle risorse e la logistica [24]. La simulazione può risultare il metodo più costoso, ma, in un'ottica di lungo periodo, essa può permettere di ottenere per l'impianto un indice LCC minore, e dunque di avere dei risparmi economici che superano di gran lunga il costo dell'investimento iniziale.

Per ottimizzare un processo dal punto di vista energetico, molto spesso, non basta spegnere i macchinari nel momento di non utilizzo o limitare la potenza erogata nelle fasi di attesa. É necessario, invece, tener conto di tutto il flusso produttivo. La maggior parte degli sprechi energetici è nascosta, infatti, dietro degli scenari non ottimali di un sistema di produzione.

1.6 Efficienza energetica e lean manufacturing

Sempre più forte è la tendenza delle imprese a ridurre gli sprechi di energia, pur mantenendo inalterato il loro *throughput*. In questo contesto, la *lean production*, è considerata una delle iniziative di gestione più significative, poiché intensifica l'utilizzo efficace delle risorse attraverso l'identificazione e l'eliminazione degli sprechi. I cosiddetti 7 *sprechi* (MUDA) sono:

1. **Sovrapproduzione.** Se la produzione non è direttamente collegata agli ordini dei clienti, si rischia di incorrere in rimanenze di prodotti. È importante, in quest'ottica, una previsione molto accurata della domanda dei clienti, per evitare stoccaggi e rimanenze.
2. **Attese.** Sono costituite da tutti quei tempi che non sono strettamente necessari al ciclo di fabbricazione del prodotto. Ad esempio, se all'interno di un sistema di produzione, è presente una stazione di assemblaggio di due componenti, provenienti da due linee differenti, potrebbe verificarsi che i due componenti non arrivino contemporaneamente alla stazione in questione e ci siano, dunque, dei tempi di attesa, che potrebbero essere eliminati aumentando l'efficienza della linea del componente in ritardo.
3. **Trasporto.** Se i sistemi di trasporto di materiale da un'area ad un'altra non vengono ottimizzati, comportano uno spreco di tempi e risorse.
4. **Perdite di processo.** È necessaria un'analisi approfondita del processo produttivo per individuare le cause di un rallentamento del flusso e di tutte quelle fasi che sono inefficienti all'interno del ciclo di lavoro perchè comportano uno spreco di tempo, spazio, costi e risorse.
5. **Scorte.** Le scorte di materie prime o semilavorati, che rimangono inutilizzate lungo il processo produttivo poiché sono in eccesso, comportano una perdita di valore.
6. **Movimenti.** Questa voce racchiude tutti quei movimenti all'interno di una postazione di lavorazione nel processo produttivo. Tali movimenti devono essere ottimizzati per ridurre il più possibile il *lead time*.
7. **Prodotti difettosi.** La realizzazione di pezzi difettosi da scartare o che necessitano delle rilavorazioni, implicano uno spreco economico. È necessario identificare le fasi e le aree del processo in cui si verifica maggiormente la creazione dei difetti, al fine di intervenire per ridurli.

Questo tipo di produzione è basata, dunque, sull'eliminazione di tutte le attività che non hanno un valore aggiunto per l'impresa, al fine di migliorare le prestazioni di un sistema di produzione [26].

L'interazione tra le tecniche *lean* e l'efficienza energetica è stata protagonista di diversi studi, ma non esistono delle tecniche standard applicabili a qualsiasi sistema di produzione: esse, infatti, variano in base alle caratteristiche specifiche del sistema considerato. Tra tutti gli strumenti *lean*, la tecnica più frequentemente utilizzata per la valutazione energetica è la Value Stream Mapping (VSM), poiché permette di visualizzare l'intero processo produttivo rappresentando flussi di materiali, informazioni ed energia. È un metodo di rappresentazione grafica dei processi e delle attività appartenenti alla *value chain* di un prodotto. Una Value Stream Map mette a fuoco tutti gli steps del processo di produzione che generano valore per il cliente.

Ad esempio, costruendo una Value Stream Map per il flusso di energia di un processo di taglio, si nota come l'energia utilizzata effettivamente per la rimozione del materiale è inferiore al 30% dell'energia totale [27]. Di conseguenza, l'energia utilizzata per tutte le altre attività, diverse dal taglio, che quindi non creano valore, è superiore al 70%. Tali attività comprendono il caricamento, il posizionamento e le diverse misurazioni del pezzo da lavorare [28].

La VSM base, di un processo produttivo, analizza soltanto il flusso di materiali (riportando, ad esempio, tempi ciclo, tempi di setup, lead time totale del sistema), e non contiene informazioni sull'uso dell'energia [29]. Per costruire una VSM del flusso di energia, è necessario, innanzitutto, condurre delle indagini energetiche sui diversi dispositivi e macchinari del sistema analizzato. I dati raccolti, riguardanti il consumo di elettricità dei diversi "steps" del processo, devono essere analizzati e inclusi all'interno della VSM dello scenario attuale.

Nell'esempio mostrato in Figura 1.6, le linee, rossa e verde, forniscono informazioni sull'energia consumata ed aiutano ad individuare eventuali colli di bottiglia relativi all'efficienza energetica. In particolare, la linea rossa indica il consumo energetico Non-Value Added (NVA), mentre la linea verde rappresenta l'utilizzo di energia Value Added (VA). È possibile, poi, aumentare il livello di dettaglio della Mappa, inserendo al suo interno i quantitativi energetici erogati da ogni singola operazione rappresentata. Come si evince dall'immagine, le operazioni di "Chip Draying" e "Hot Pressing" presentano un alto consumo energetico NVA [29].

Consultando gli esperti in materia del processo produttivo in esame, si comprende come l'elevato consumo energetico dipende, in gran parte, dalla tecnologia utilizzata [29].

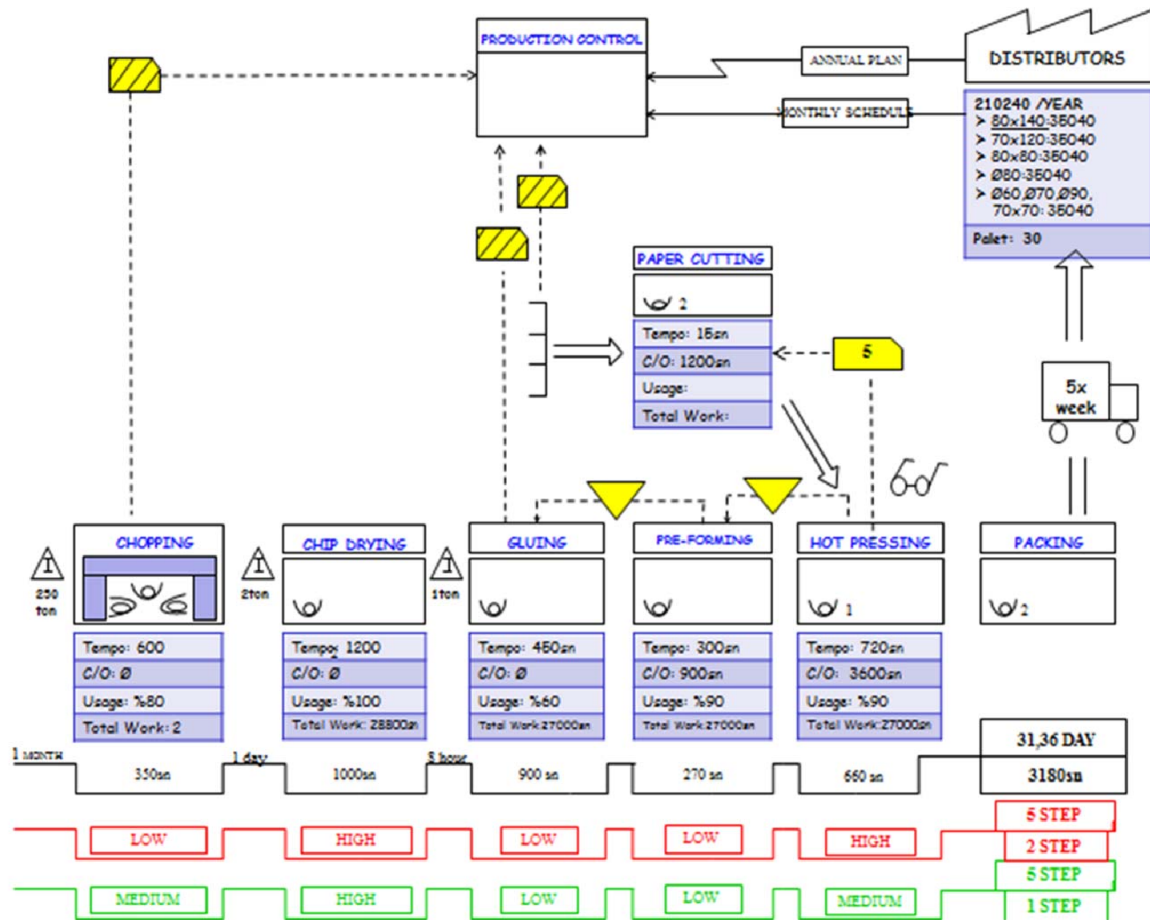


Figura 1.6: Esempio di VSM per l'efficienza energetica dello scenario attuale [29]

Dopo aver completato la costruzione dello stato attuale, può essere creata la Mappa dello scenario futuro (Figura 1.7), sulla base degli obiettivi di riduzione dell'utilizzo di energia. Questa nuova mappa indica delle vie da seguire per implementare una nuova strategia di produzione.

Effettuando un confronto economico tra lo scenario attuale e lo scenario futuro, si osserva che, la riduzione dei costi di utilizzo dell'energia compenserà i costi della nuova tecnologia, consentendo un recupero dell'investimento in soli due anni [29].

All'interno di un sistema produttivo, ci sono, poi, anche degli step che non forniscono un valore diretto al consumatore, ma che assicurano la consegna del prodotto/servizio finale. Ad esempio, il Controllo Qualità, non fornisce un valore aggiuntivo per il cliente (infatti egli non è disposto a pagare per questo), ma è necessario se un'impresa vuole essere sicura di consegnare un prodotto finito che rispetti tutti gli standard di qualità e le specifiche richieste dal cliente.

Tutti gli studi, orientati alla VSM di energia, tentano di delineare i flussi di energia all'interno di una struttura o attraverso la supply chain. Tale modellizzazione dei consumi energetici dei sistemi di produzione può essere supportata dalla simu-

lazione, attraverso la progettazione e l'implementazione di modelli digitali (*digital twins*) dei sistemi di produzione stessi.

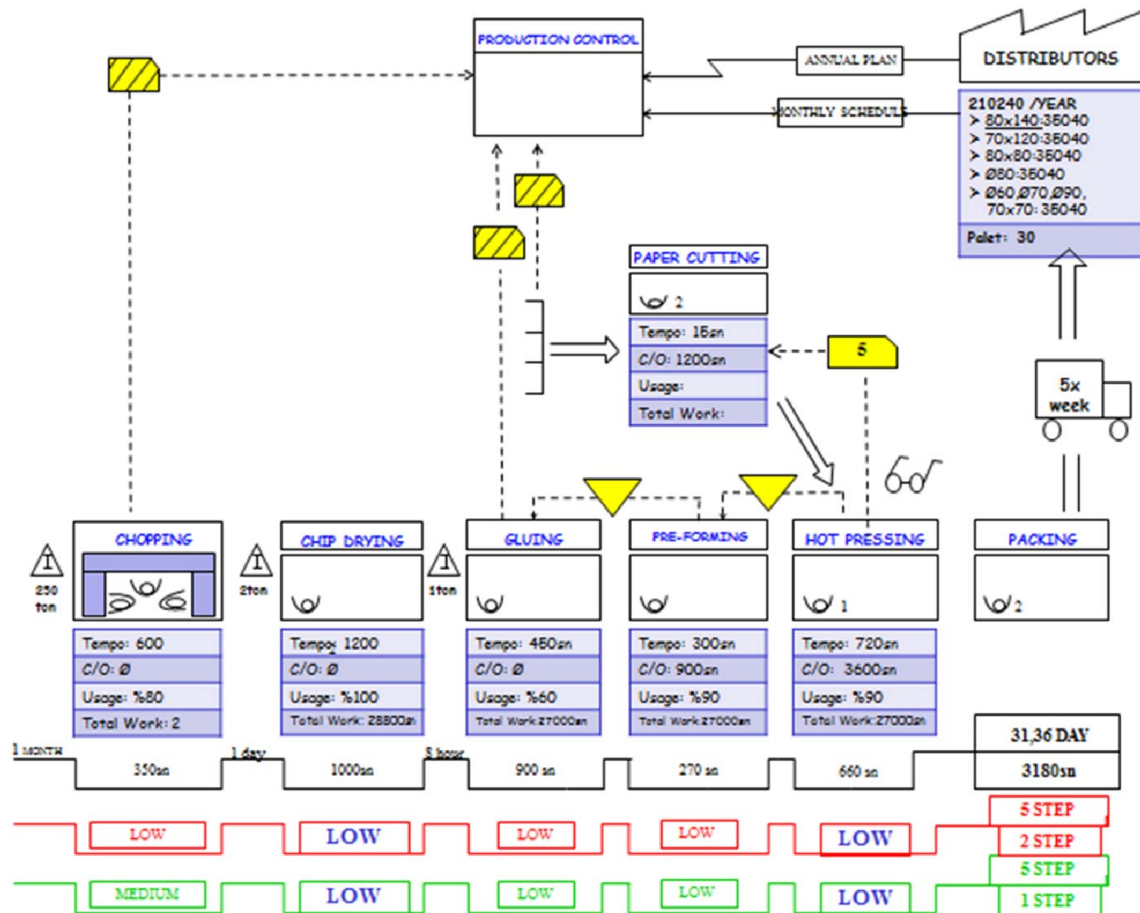


Figura 1.7: Esempio di VSM per l'efficienza energetica dello scenario futuro [29]

Baysan et al. [30] propongono una nuova metodologia che integra la VSM, l'analisi di processo, la progettazione degli esperimenti (DOE), la simulazione e l'analisi statistica all'interno di quattro moduli (Figura 1.8).

1. **Analisi dello Stato Attuale (Scenario AS-IS).** Dopo aver selezionato una famiglia di prodotti, viene utilizzato un approccio VSM che coinvolge i consumi di energia per lo stato corrente del *value stream*. Nelle diverse fasi del sistema di produzione, dunque, vengono osservati i consumi di energia che danno un valore aggiunto e quelli che non danno valore aggiunto. In seguito, viene costruito un modello di simulazione rappresentativo dello stato attuale del sistema di produzione, per osservare le sue prestazioni in condizioni dinamiche, che imitano le impostazioni reali. La simulazione aiuta a modellare sistemi complessi e variabili che non possono essere rappresentati con il VSM convenzionale. Viene, poi, effettuata la contabilità energetica, cioè la misura e

l'analisi del consumo energetico delle diverse attività. Alla fine dell'analisi dello stato attuale, sono formulate alcune ipotesi sugli effetti che le diverse tecniche lean e le varie configurazioni di sistema hanno sul consumo di energia.

2. **Progettazione dello Stato Futuro (Scenario TO-BE).** Poiché possono essere progettate diverse VSM dello stato futuro, viene costruito un *Experimental Design* con i diversi scenari alternativi. Per osservare le prestazioni di ogni scenario, è necessario costruire un modello di simulazione per ognuno di essi. Vengono eseguiti, poi, come nel modulo precedente, i calcoli di contabilità energetica relativi ad ogni scenario, al fine di confrontare le diverse alternative.
3. **What-if analysis e convalida del progetto.** In questo modulo vengono applicati metodi di analisi statistica per confrontare gli effetti delle tecniche lean e delle configurazioni di sistema in termini di *lead time* e consumo energetico. La what-if analysis è un'analisi predittiva che supporta i processi decisionali, fornendo le indicazioni e un orientamento per le strategie di lungo termine. Lo scopo è quello di valutare l'impatto di una variabile (per esempio la scelta di effettuare un investimento) su altre variabili, come i costi e i profitti. Tale analisi, in pratica, consiste nello sviluppo di scenari alternativi partendo da un *se*. Variando alcuni parametri, è possibile simulare diversi scenari e, quindi, capire quale impatto avrebbe una determinata scelta sul profitto di un'impresa. Le ipotesi sono formulate in base a ciò che si intende valutare. Se le ipotesi sono confermate, si può iniziare l'ultima fase. Se le ipotesi non possono essere convalidate, allora devono essere riformulate e devono essere costruiti nuovi diversi scenari futuri.
4. **Implementazione.** Dopo l'implementazione dello scenario convalidato, quello che era lo Stato Futuro diventa lo Stato Attuale.

L'intera procedura, appena descritta, viene implementata ogni qual volta è necessaria una modifica dell'impianto, in termini di aumento di capacità e/o produzione di nuovi prodotti, o se si vuole monitorare lo stato attuale, nell'ottica del miglioramento continuo. Il monitoraggio è importante soprattutto per verificare se lo scenario implementato sia effettivamente conforme a quello previsto.

Per comprendere meglio questo concetto, si considerino, ad esempio, due linee di produzione, collegate da un sistema di trasporto. Si ipotizzi che, in fase di pianificazione, la linea a monte sia stata considerata con un'efficienza superiore di quella a valle e che, di conseguenza, sia stato previsto un moto continuo e una determinata velocità per il sistema di trasporto, in modo che non si intasi mai la linea. Se, poi,

dopo aver implementato lo scenario, grazie ad un sistema di monitoraggio, si verifica che la linea a monte ha un'efficienza effettiva minore di quella a valle, allora per gran parte del tempo il sistema di trasporto sarà vuoto e la stazione a valle in attesa.

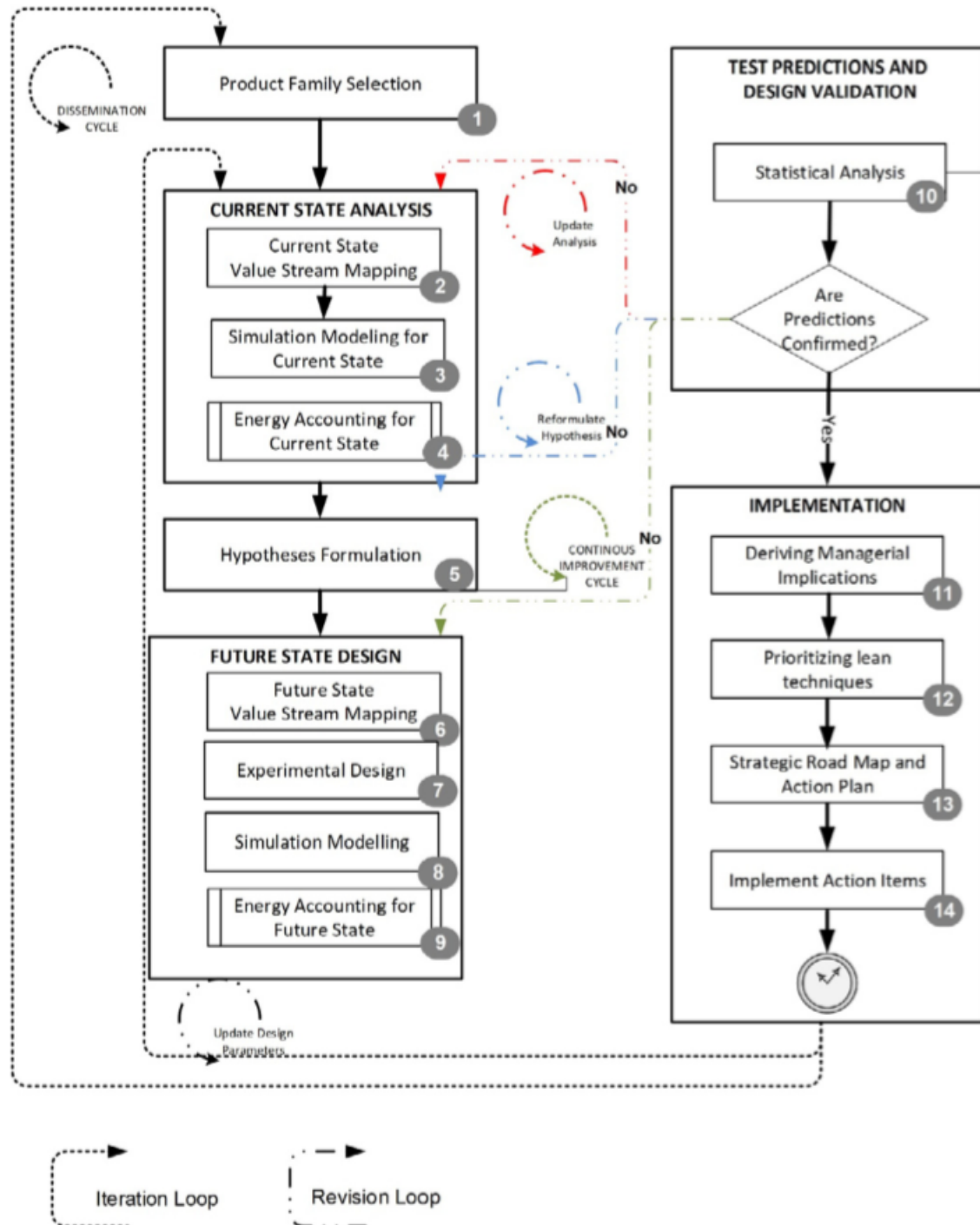


Figura 1.8: Flowchart della metodologia proposta da Baysan et al. [30]

Tutto ciò si traduce in uno spreco di energia e di tempo. Tale problema può essere risolto o implementando nuove tecniche per aumentare l'efficienza della stazione a

monte, oppure riducendo la velocità del sistema di trasporto in modo da avere un minore spreco di energia.

Nell'ottica della gestione, del monitoraggio e del miglioramento continuo, fondamentale è l'utilizzo di alcuni strumenti come il Failure Reporting, Analysis and Corrective Action System (FRACAS) e il Plan Do Check Act (PDCA).

Il FRACAS è un sistema che fornisce una metodologia per la segnalazione dei guasti e la loro analisi per la pianificazione di azioni correttive. Il sistema registra, quindi, i problemi relativi ad un prodotto (difetti) o ad un processo (guasti) e la rispettiva causa, dando una priorità in base al rischio. Se le risorse non soddisfano i livelli di affidabilità desiderati e i prodotti non rispettano gli standard di qualità, a causa di difetti e guasti non pianificati, bisogna implementare azioni correttive adeguate.

Un altro sistema, diretto al miglioramento continuo, è il ciclo PDCA, implementato all'interno di un Sistema di Gestione dell'Energia (SGE) secondo la norma ISO 50001.

La fase di pianificazione prevede di individuare gli *aspetti* energetici delle diverse attività svolte da un'impresa per comprendere quali sono gli elementi, o energy drivers, che influenzano in modo significativo i consumi: si identificano, di conseguenza, obiettivi e programmi di miglioramento.

La seconda fase è quella dell'attuazione, che è incentrata sullo sviluppo di capacità necessarie all'implementazione della politica energetica stabilita e, quindi, al raggiungimento degli obiettivi. Sono molto importanti, in questa fase le competenze, la consapevolezza e la formazione del personale di tutta l'organizzazione.

Durante la fase di *check* sono, poi, previsti controlli per valutare se l'organizzazione sta andando nella giusta direzione, cioè se i programmi e gli obiettivi pianificati sono effettivamente rispettati. Dunque, sono attivate procedure per misurare i consumi energetici e analizzare eventuali scostamenti rispetto agli standard stabiliti. Nel momento in cui si verifica una non conformità (o deviazione), è opportuno intraprendere azioni correttive adeguate.

L'ultima fase del ciclo prevede la revisione, da parte della direzione centrale, del SGE per verificare la sua efficienza ed adeguatezza. Tale revisione, che deve essere documentata e indirizzata verso gli opportuni cambiamenti nella politica energetica e negli obiettivi, deve tener conto dei risultati degli *audit*, dei cambiamenti del mercato o del settore in cui opera l'impresa e del perseguimento del miglioramento continuo.

1.6.1 Contabilità energetica

Nei moduli 1 e 2 della metodologia proposta da Baysan et al. [30], si effettua la cosiddetta contabilità energetica. Il metodo per eseguire tale contabilità è sempre illustrato nello stesso articolo [30] ed è descritto di seguito.

Innanzitutto è necessario aggiungere, alla Value Stream Map dell'intero sistema di produzione, i seguenti parametri relativi all'energia.

- Tassi di consumo di carburante e/o elettricità dei veicoli di movimentazione dei materiali
- Potenza del motore di ogni processo di lavorazione
- Potenza spesa per il riscaldamento o il raffreddamento (per ogni processo)
- Consumo energetico per l'illuminazione dell'area

Si procede, poi, con il calcolo del consumo standard di energia, cioè del consumo totale di energia, in uno stato ideale, per la produzione di un prodotto rappresentativo. Se in un sistema produttivo vengono lavorati prodotti diversi, si utilizzano, per il calcolo, i valori medi dei parametri sopramenzionati.

Il consumo di energia che comporta un valore aggiunto e_{VA} , per un singolo prodotto, è pari alla somma dei consumi di energia, e_i , di tutti gli n processi all'interno della Value Stream Map. Il consumo di energia di un singolo processo è uguale al prodotto tra il tempo ciclo e la potenza del motore del processo stesso. Tale valore deve, infine, essere moltiplicato per la quantità prodotta in un periodo specifico.

Il passaggio successivo riguarda il calcolo di tutti gli sprechi energetici lungo il Value Stream, formato da n processi.

Gli sprechi dovuti alla sovrapproduzione [30] si verificano a causa di una produzione che supera la domanda. La condizione $TH_i > D$ implica che il throughput del processo i -esimo è maggiore della domanda. La quantità di energia consumata per produrre la quantità in eccesso, è considerata uno spreco.

$$Overproduction\ waste = \begin{cases} \sum_{i=1}^n (TH_i - D)e_i & TH_i > D \\ 0 & altrimenti \end{cases} \quad (1.27)$$

Gli scarti dovuti al trasporto e alla movimentazione [30] sono calcolati in base al throughput, TH_i , diviso per la dimensione dei lotti di ogni processo, Q_i . Questo

rapporto è moltiplicato per la distanza tra due processi consecutivi, d_{ij} , e il consumo unitario (per metro) di energia del veicolo v necessario per trasportare il prodotto dal processo i al processo j , e_{ijv} . CM è l'insieme delle coppie (i,j) di processi consecutivi.

$$\text{Transportation and handling waste} = \sum_{(i,j) \in CM} \frac{TH_i}{Q_i} d_{ij} e_{ijv} \quad (1.28)$$

Il consumo energetico dovuto alle rimanenze di magazzino [30] è approssimato all'eccesso di produzione, $(TH_i - D)$, moltiplicato per il prodotto tra l'area occupata da questo stock, a_i , e la somma dei consumi energetici, per unità di area, dovuti al riscaldamento e all'illuminazione, $(h_i + l_i)$.

$$\text{Waiting and inventory waste} = \sum_{i=1}^n (TH_i - D) a_i (h_i + l_i) \quad (1.29)$$

Si ha, infine, lo spreco di energia dovuto ad eventuali rilavorazioni [30]. Tale consumo è calcolato come la sommatoria, per gli n processi, del prodotto tra il numero di parti difettose prodotte dal processo i -esimo e il consumo di energia del processo i -esimo stesso.

$$\text{Rework waste} = \left(\frac{D}{\prod_{i=1}^n (1 - ftt_i)} - D \right) e_{VA} \quad (1.30)$$

ftt_i è il First Time Through per il processo i -esimo, che misura la percentuale di prodotti lavorati non difettosi, cioè che non hanno bisogno di rilavorazioni o di essere scartati.

È possibile, dunque, calcolare, per un determinato periodo di tempo, il consumo energetico che non genera un valore aggiunto, e_{NVA} , sommando tutti gli sprechi energetici dovuti a sovrapproduzione, trasporto e movimentazione, attesa e rimanenze, e rilavorazione [30].

In definitiva, il consumo di energia totale del Value Stream in un determinato periodo di tempo T , e_T , è dato dalla seguente equazione.

$$e_T = e_{VA} + e_{NVA} \quad (1.31)$$

L'obiettivo, di tutta questa analisi, è concentrarsi sull'identificazione degli sprechi per eliminarli e ridurre il consumo di energia e i tempi di consegna dei prodotti finiti.

I costi dell'energia e di altre risorse produttive sono in costante aumento, a causa della domanda sempre crescente rispetto all'offerta limitata.

Una strategia per far fronte a quest'aumento dei costi, potrebbe essere quella di aumentare i prezzi con cui i prodotti finiti sono venduti al cliente. Tuttavia, tale strategia potrebbe essere dannosa, soprattutto per quelle imprese che operano in settori caratterizzati da una domanda elastica: infatti, se il prodotto venduto è una *commodity* o è poco differenziabile o, ancora, esistono dei prodotti sostituti, che soddisfano lo stesso bisogno del prodotto in questione, allora i clienti sono molto sensibili a delle variazioni di prezzo, e le imprese, aumentando il prezzo, perdono quota di mercato.

In alternativa, si può applicare una strategia di *cost leadership*: l'impresa, riducendo il consumo di risorse e migliorando l'organizzazione del sistema di produzione, può raggiungere una maggiore efficienza.

Il documento di Baysan et al. [30] fornisce una metodologia per applicare la seconda strategia e valutare il vantaggio delle tecniche di *lean production*. In questo scenario, l'eliminazione dei consumi di energia, che non comportano un valore aggiunto per il prodotto lavorato, costituisce un punto cruciale. L'analisi energetica è integrata all'interno della Value Stream Map, al fine di comprendere dove si trovano le maggiori fonti di spreco e suggerire mosse future per il miglioramento continuo dell'intero sistema.

1.7 Modelli di simulazione

Come già affermato, il successo di un sistema di gestione dell'energia dipende dalla qualità della stima dei consumi energetici. Infatti, prevedendo e controllando il proprio profilo energetico, le imprese possono individuare i picchi di carico per cercare di ridurli e, di conseguenza, diminuire la domanda di energia elettrica in tali periodi. In questo modo è possibile beneficiare di prezzi inferiori nel mercato dell'energia a breve termine [31]. Dunque, uno strumento come la simulazione, che permetta di predire il carico elettrico, può essere utile per prendere decisioni relative all'acquisto e alla generazione di potenza elettrica.

La simulazione consiste nel creare un modello del sistema reale, che comprende tutte le caratteristiche rilevanti del sistema stesso, e poi utilizzarlo per effettuare esperimenti per comprendere il suo comportamento ed ottimizzarlo.

Law e Kelton [24] classificano i modelli di simulazione lungo tre diverse dimensioni.

Modelli di simulazione statici o dinamici. Un modello di simulazione statico è la rappresentazione di un sistema in un determinato istante di tempo, oppure di un sistema in cui il tempo non gioca alcun ruolo. Un modello di simulazione dinamico, invece, rappresenta l'evoluzione di un sistema nel tempo. Un esempio di questi ultimi sono i sistemi di trasporto di uno stabilimento industriale.

Modelli di simulazione deterministici o stocastici. Se un modello di simulazione non contiene componenti probabilistiche, esso è chiamato deterministico. Nei modelli deterministici, l'output è determinato una volta aver specificato l'insieme delle quantità e delle relazioni di input del modello. Se, invece, i sistemi sono modellati con delle componenti di input casuali, allora si darà origine a modelli di simulazione stocastici. Tali modelli producono un output anch'esso casuale, e quindi devono essere considerati soltanto come una stima delle reali caratteristiche del modello.

Modelli di simulazione continui o discreti. I sistemi possono essere di due tipi, discreti e continui. Un sistema discreto è quel sistema in cui le variabili di stato cambiano istantaneamente, in istanti di tempo separati e ben distinti tra loro. Un sistema continuo, invece, è un sistema in cui le variabili di stato cambiano continuamente nel tempo. I sistemi, di solito, sono in parte continui ed in parte discreti, ma essi vengono classificati in base al tipo di variabili predominanti.

Tipicamente, un flusso di materiale viene simulato utilizzando la simulazione ad eventi discreti (DES), mentre un flusso di energia o, in generale, altri fenomeni dettati da leggi fisiche, sono descritti tramite una simulazione continua che risolve delle equazioni differenziali ordinarie (ODE) o algebriche (DAE) [32].

In generale, la simulazione ad eventi discreti è la tecnica maggiormente utilizzata per comprendere e analizzare i sistemi produttivi complessi [33], perché permette di intraprendere uno studio dell'impatto della casualità sul comportamento di un sistema reale, utilizzando, inoltre, un alto livello di dettaglio degli oggetti che rappresentano il sistema stesso [34]. Al contrario, la simulazione continua si occupa delle relazioni deterministiche causa-effetto e presuppone un basso livello di dettaglio degli elementi del sistema studiato [34].

Ci sono molti esempi di simulazione applicati alla Value Stream Map. Tuttavia,

come si può notare dalla tipologia di dati utilizzati, gli obiettivi della simulazione e della VSM sono differenti. Ad esempio, nella VSM, i tempi ciclo e la dimensione dei buffers sono dei dati statici, mentre nella DES, come anche nel mondo reale, la lunghezza delle “code” cambia dinamicamente e i tempi ciclo sono delle variabili stocastiche. Dunque, per realizzare una DES a partire da una VSM, è necessario acquisire ulteriori dati di input: ad esempio, se la VSM riporta soltanto il tasso medio di arrivo dei pezzi all’interno di un sistema produttivo, la DES include la programmazione di ogni singolo arrivo [34].

1.7.1 Applicazioni della Discrete Event Simulation

La simulazione ad eventi discreti può essere utilizzata per obiettivi diversi come, ad esempio, la stima della dimensione delle aree di stoccaggio all’interno di uno stabilimento, il confronto di differenti scenari produttivi o, ancora, la pianificazione dei sistemi di movimentazione dei materiali [33]. Tutto ciò è particolarmente rilevante per i sistemi di produzione con un alto grado di complessità, in cui non sono possibili descrizioni analitiche complete dei diversi problemi.

Piccinini et al. [35] tramite la DES analizzano un sistema di produzione complesso, relativo al settore automotive italiano: lo scopo dell’analisi è ottimizzare la schedulazione della produzione minimizzando il Takt Time dell’impianto e il Work in Process (WIP) in seguito all’introduzione di una stazione di verniciatura nel processo di produzione. Per raggiungere questo scopo sono stati implementati diversi scenari *what if* per definire la configurazione migliore, prendendo in considerazione i molteplici vincoli del sistema di produzione reale.

In generale, un modello di simulazione costituisce un valido supporto per i diversi processi decisionali: dunque, sempre più imprese cercano di inserirlo all’interno di una struttura di controllo della produzione. A tal proposito, Kasakow et al. [36] descrivono un metodo per controllare un sistema di produzione flessibile, basato sulla DES: l’Event-Driven Production Control (EDPC). Tale sistema registra l’ordine di un cliente, analizzandone la distinta base e identificando le parti posizionate alla fine di ogni “percorso”. Una volta acquistate e arrivate le parti necessarie, l’EDPC crea una classifica degli ordini di produzione, ordinandoli in base alla logica first-in first-out (FIFO).

L’approccio DES, appena descritto, non considera, però, i numerosi fenomeni fisici che possono influenzare il sistema di produzione. Ad esempio, i diversi prodotti potrebbero essere soggetti ad un ribaltamento durante le varie movimentazioni e, dunque, uno studio della dinamica e della cinematica dei corpi rigidi potrebbe portare ad una previsione più accurata dei disturbi che influenzano il sistema. Tuttavia,

modellare e calcolare ogni specifico effetto fisico potrebbe essere troppo dispendioso in termini di tempo.

L’approccio proposto da Glatt et al. [33] combina la simulazione ad eventi discreti del flusso di materiale con la simulazione dei comportamenti fisici degli elementi del sistema, al fine di fornire una simulazione con un maggiore livello di dettaglio. La DES costituisce, comunque, il fondamento logico della simulazione e determina il comportamento generale del sistema di produzione simulato. Naturalmente, per descrivere i diversi fenomeni fisici che si verificano durante i processi di gestione del materiale, sono necessari dati di input aggiuntivi oltre a quelli normalmente utilizzati per una DES.

Un altro ostacolo che si può riscontrare nell’utilizzo della DES riguarda la gestione dei dati. Infatti, è molto importante che si sviluppi un sistema automatico di gestione dei risultati, che permetta di creare documenti standard facilmente accessibili e comprensibili per tutti quegli stakeholders che non hanno conoscenza del software di simulazione utilizzato e del modello creato [37].

1.7.2 Tecniche DES applicate ad un flusso di energia.

All’interno della letteratura scientifica, sono presenti diversi studi che si propongono di analizzare, attraverso la simulazione, il comportamento del consumo e della generazione di energia elettrica in combinazione con altre variabili del processo. Ad esempio, lo studio condotto da Paulista et al. [25] è incentrato sull’applicazione della DES al consumo di energia elettrica e alla generazione fotovoltaica: la presenza di smart meters ha permesso di realizzare con precisione il profilo di consumo delle apparecchiature con domanda di elettricità variabile e, la presenza di dati storici riguardanti l’irraggiamento solare, ha consentito la corretta rappresentazione delle curve di domanda.

Tuttavia, l’acquisizione dei dati per costruire i vari profili di carico costituisce uno dei principali ostacoli alla corretta applicazione delle simulazioni energetiche [38]. Per tale ragione, la maggior parte degli approcci esistenti sulla simulazione del flusso di energia, includono soltanto i valori medi del carico elettrico, senza prenderne in considerazione l’intero profilo [38].

Uno degli approcci più significativi nel campo della pianificazione consapevole dell’energia, è quello di Thiede [39] [40], basato su una simulazione multi-livello, in cui si combinano diversi sottosistemi per formare un modello integrato. Nel caso studio, trattato nel Terzo Capitolo, non verranno creati diversi ambienti di simulazione, ma l’obiettivo è quello di rappresentare simultaneamente, in un unico modello, il flusso di materiali ed il flusso di energia elettrica di un processo produttivo.

In particolare, il modello in questione sarà realizzato attraverso un software Discrete Event Simulation (DES). La DES, nel caso venga utilizzato un approccio stocastico, può essere eseguita anche per risolvere i problemi caratterizzati da un approccio continuo, come il flusso di energia. Quando la DES è collegata al flusso di energia, è consuetudine considerare, come si vedrà in seguito, differenti stati operativi per uno stesso macchinario [25].

Nel caso studio sviluppato da Sobottka et al. [32], che presenta una simulazione ibrida caratterizzata dall'interazione tra il flusso di materiale e il comportamento termo-fisico dei macchinari, la linea di produzione in esame presenta nove macchinari di produzione principali, nove nastri trasportatori (conveyors) e due componenti di stoccaggio. La semplicità di tale sistema lascia intendere la difficoltà di applicazione della DES ad un sistema più complesso.

A differenza di questo e di altri casi studio, la tesi si propone di studiare un sistema molto più complesso, caratterizzato da più di cinquanta stazioni di lavoro e da molteplici sistemi di trasporto di diverso tipo e complessità. Nel panorama della letteratura scientifica analizzata, il cosiddetto “research gap” è costituito proprio dalla bassa complessità dei sistemi fin’ora studiati con la DES dal punto di vista del flusso di energia.

La chiave è quella di comprendere a fondo come ogni componente interagisce con gli altri e qual è il consumo energetico associato ad ogni evento che si realizza, cioè ad ogni singola movimentazione o lavorazione di un pezzo. La quantità di dati da gestire implica l'impossibilità di utilizzare per l'analisi uno strumento diverso dalla simulazione. Infatti, nonostante attraverso un monitoraggio dei consumi sia possibile sicuramente determinare una funzione che rappresenti il consumo energetico di ogni singolo macchinario o strumento di movimentazione, è impossibile trovare una legge che descriva la fitta rete di interazioni che, di volta in volta, si verificano all'interno del sistema. Dunque, il maggiore o il minore consumo di energia da parte di un componente della linea produttiva dipende non solo dal suo stato attuale, ma anche dal modo in cui esso interagisce con gli altri componenti. In questo scenario, le logiche di interazione costituiscono un elemento fondamentale per la valutazione dei consumi energetici e la loro successiva gestione.

Un altro elemento, che incrementa la complessità del sistema, è la presenza di varianti di un determinato prodotto. Infatti, è importante sottolineare che il consumo di energia della maggior parte dei processi produttivi spesso dipende da diverse componenti con specifici profili energetici. Ciò vuol dire che ogni macchinario può essere formato da diverse componenti che si attivano o meno a seconda del tipo di lavorazione da svolgere. L'attivazione o la disattivazione dei singoli componenti

può essere influenzata, appunto, dal tipo di prodotto lavorato. Ad esempio, se due varianti sono lavorate da uno stesso macchinario, i differenti quantitativi energetici rilevati sono attribuibili ai differenti processi di lavorazione richiesti.

Capitolo 2

Integrazione e interconnessione

Il presente capitolo ha come obiettivo quello di introdurre la realtà aziendale della SimTec, impresa in cui è stata realizzata la tesi, fornendo, inoltre, una descrizione del panorama tecnologico e normativo, in continua evoluzione, che caratterizza sempre di più l'ingegneria della produzione. In tale scenario la SimTec apporta un valore aggiunto attraverso lo strumento della simulazione, che permette di studiare i processi produttivi, per verificare la necessità di interventi migliorativi o per testarne il comportamento in fase di progettazione preliminare.

2.1 Industry 4.0

La Lean Production, di cui si è parlato nel Paragrafo 1.5, è un sistema di produzione orientato all'apprendimento dell'organizzazione al fine di conseguire miglioramenti continui [41]. Essa è implementata per ottenere la massima qualità, il minor costo e il minor lead time, allineando la produzione al ritmo della domanda. Mayr et al. [42] collegano concettualmente la Lean Production all'Industry 4.0, mostrando come gli strumenti di quest'ultima siano utili per il raggiungimento degli obiettivi Lean (Figura 2.1).

L'Industria 4.0 propone un nuovo tipo di sistema produttivo, che permette di creare una rete intelligente di macchine, prodotti, componenti, proprietà, individui e sistemi ICT lungo l'intera value chain per avere una fabbrica intelligente (Smart Factory) [41]. Quest'ultima è composta da diversi elementi tra cui i macchinari di lavorazione, i robots, i sistemi di movimentazione del materiale (come gli AGV e i conveyors), i sistemi di controllo e i meccanismi per la raccolta, l'elaborazione e il feedback delle informazioni [43]. Tutti questi elementi devono essere *smart*. Per esempio, un macchinario di lavorazione deve essere provvisto di sensori che registrino il suo stato e i dati relativi alla performance.

Lean methods	JIT/ JIS	Hei- junka	Kanban	VSM	TPM			SMED	VM			Poka- yoke
					1*	2**	3***		5 S	Zoning	Andon	
14.0 tools												
Additive manufacturing (AM)	x					x		x				
Plug and play							x	x				
Automated guided vehicles (AGV)	x		x									
Human-computer interaction (HCI)			x	x	x				x	x	x	x
Virtual representation (e.g. VR, AR)	x				x			x	x	x		x
Intelligent bins	x		x									
Auto-ID	x		x	x	x			x	x	x		x
Digital object memory	x				x			x				x
Digital twin/simulation	x	x	x	x		x	x	x	x			
Cloud computing	x			x	x	x						x
Real-time computing	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Big data & data analytics	x	x	x	x	x	x						x
Machine learning				x	x			x				x

* autonomous maintenance, ** planned maintenance, *** early product and equipment management

Figura 2.1: Collegamenti tra strumenti Industry 4.0 e metodi Lean [42]

La sfida è quella di adattarsi alle richieste dei clienti in tempi sempre più brevi e fornire un prodotto sempre più personalizzato [44]. L'Industria 4.0 è considerata una strategia per essere competitivi nel lungo periodo: essa può essere definita come "l'integrazione di complessi macchinari e dispositivi fisici con sensori e software di rete, utilizzati per prevedere, controllare e pianificare al fine di ottenere migliori risultati e profitti aziendali" [45] oppure come "un nuovo livello di organizzazione e gestione della value chain attraverso il ciclo di vita dei prodotti" [46].

In questo scenario sono di grande rilevanza i Cyber Physical Systems (CPS), cioè dei sistemi costituiti da un insieme di tecnologie che rendono possibile "l'integrazione tra soggetti diversi e fisicamente distanti" [44]. Dunque, per ogni oggetto di un sistema produttivo è necessario creare una sua rappresentazione virtuale, la quale deve poter acquisire i dati, elaborarli, memorizzarli e comunicarli ad altri oggetti presenti nella rete. La comunicazione di tali dati in tempo reale e la fitta rete di interazioni, resa possibile grazie a tecnologie come l'Internet Of Things, fanno sì che i sistemi produttivi diventino sempre più flessibili e che i singoli oggetti al loro interno siano capaci di prendere decisioni autonome ("intelligenza decentrata" [44]).

Tabella 2.1: L'evoluzione della produzione [41]

	Past	Present	Future
Communication System	Analog	Internet and Intranet	Internet of Things Cyber Physics System
Concept	Neo-Taylorism	Lean Production	Smart Factory
Solution	Mechanization and automation	Automation and Computerization	Virtualization and integration

Nella Tabella 2.1, proposta da Mrugalska e Wyrwicka [41], si nota come i CSP e l'Internet of Things guideranno l'evoluzione della produzione.

L'Industria 4.0 può essere ulteriormente definita da tre concetti: *Smart Product*, *Smart Machine* e *Augmented Operator* [41].

- L'idea principale dello Smart Product (o “prodotto intelligente”) è quello di cambiare il suo ruolo da parte passiva a parte attiva del sistema. Dunque i prodotti diventano degli oggetti dotati di memoria, in cui si possono archiviare dati e caratteristiche operative, richiedendo di volta in volta le risorse necessarie e coordinando il processo produttivo per il proprio completamento. Una caratteristica fondamentale dei prodotti intelligenti è la connettività, che permette loro di connettersi ad altri prodotti, esseri umani, dati e servizi [43]. Esempi pratici di prodotti intelligenti sono gli smartphone, le illuminazioni intelligenti, i termostati intelligenti e gli smart meters. Nel caso specifico di un processo produttivo, un prodotto, che deve attraversare una serie di macchinari di lavorazione, può essere quindi dotato di sensori che permettano di identificare il suo stato all'interno del sistema (ad esempio qual è stata l'ultima operazione a cui è stato sottoposto e quale dovrà essere la prossima) oppure di registrare informazioni che consentano di verificare la sua conformità rispetto a delle specifiche tecniche.
- Con il concetto di Smart Machine, la tradizionale produzione gerarchica è sostituita da una linea di produzione flessibile e modulare e da un'organizzazione decentralizzata resa possibile dal CPS. Le macchine sono dotate di tecnologie come sensori, attuatori e video wireless, che raccolgono dati che sono poi inviati al Cloud per ottenere una migliore intelligenza operativa e un maggiore controllo sul flusso produttivo.
- L'Augmented Operator è la parte più flessibile all'interno del sistema di produzione e può interferire manualmente nel sistema produttivo, ricoprendo il ruolo di decisore strategico e di risolutore di problemi dovuti alla crescente complessità tecnologica. Egli è un operatore che può essere dotato di dispositivi che gli permettono di visualizzare in tempo reale un errore che insorge nel sistema produttivo e, dunque, di intervenire tempestivamente avviando azioni di riparazione. Tali avvisi possono, poi, essere registrati all'interno di un database e studiati sempre nell'ottica del miglioramento continuo.

La gestione della complessità è un requisito fondamentale per qualsiasi impresa che volesse implementare una strategia basata sull'Industria 4.0. In quest'ottica è di fondamentale importanza riuscire ad integrare componenti fisici, risorse umane e Smart Factories, ma anche fornitori, clienti, progettazione dei prodotti e produzione degli stessi, grazie alla comunicazione di dati in tempo reale.

2.2 Dalle norme ISO al PLM

L'International Organization for Standardization (ISO), con sede a Ginevra, è l'organizzazione mondiale più importante che, dal 1947, definisce delle norme tecniche affinché esse diventino universali. Un esempio è la ISO 9001, che costituisce la normativa di riferimento per chiunque voglia sottoporre ad un Controllo Qualità un prodotto o un processo produttivo. Il Controllo Qualità mette al centro del processo produttivo il cliente e la soddisfazione delle sue esigenze ed aspettative. Aumentando la qualità si può, infatti, aumentare il beneficio percepito dai clienti nell'acquistare un prodotto o un servizio. La certificazione che attesta la conformità di un'azienda alla norma ISO 9001 è indispensabile per tutte quelle imprese che puntano a garantire al cliente la qualità dei propri prodotti o servizi.

Oltre che di "qualità di prodotto o di servizio", all'interno delle aziende si parla sempre di più di "qualità ambientale", regolata dalla norma ISO 14001, che mira a favorire l'impegno consapevole delle aziende nei confronti dei problemi ambientali, promuovendo uno sviluppo sostenibile nell'ottica della prevenzione dei problemi di inquinamento derivanti dai processi produttivi e dallo smaltimento dei prodotti alla fine del loro ciclo di vita. All'interno dell'analisi dei diversi aspetti ambientali che è necessario considerare per una valutazione complessiva dell'intero processo produttivo, troviamo l'aspetto relativo all'assorbimento energetico e alle diverse emissioni nocive causate dall'utilizzo di energia. La norma ISO 50001 si preoccupa proprio di questi aspetti, prevedendo un impegno diretto da parte del top management di un'organizzazione verso l'uso razionale dell'energia e l'emissione di una politica energetica basata sulla misura delle prestazioni energetiche e sul miglioramento continuo. Entrambe le norme, ISO 14001 e ISO 50001, definiscono dei sistemi di gestione che hanno come base comune il ciclo Plan Do Check Act (PDCA), di cui si è parlato nel Paragrafo 1.6.

In questo panorama, lo sviluppo dell'industria 4.0 favorisce la digitalizzazione dei processi produttivi e automatizza i procedimenti dettati dalle diverse normative. Centrale, in questa trasformazione digitale, è l'utilizzo dei software Product Lifecycle

Management (PLM), che si preoccupano della gestione dell'intero ciclo di vita di un prodotto, a partire dalle fasi iniziali di definizione delle specifiche tecniche e di progettazione, fino alla gestione dei servizi post-vendita e allo smaltimento.

Tutto ciò è possibile grazie ad un sistema di condivisione dei dati che coinvolge diversi software. I macchinari più moderni possono comunicare con tali software attraverso un proprio linguaggio, mentre i macchinari meno recenti hanno bisogno di appositi sensori per parlare con i diversi sistemi.

I sistemi Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) sono proprio quei sistemi che acquisiscono e mostrano i dati dei macchinari per aiutare gli operatori addetti a monitorare il processo produttivo. Tali dati sono raccolti in tempo reale attraverso un Programmable Logic Controller (PLC), cioè un insieme di dispositivi interconnessi che elaborano i segnali digitali e analogici provenienti dai sensori.

I Manufacturing Execution System (MES) utilizzano i dati forniti dai sistemi SCADA/PLC per gestire il processo produttivo di un'azienda: la gestione riguarda una molteplicità di funzioni, dalla pianificazione della produzione e degli ordini, fino al controllo qualità e alla manutenzione dei macchinari. Mentre i sistemi SCADA sono utilizzati dagli operatori di uno stabilimento, i sistemi MES agiscono al livello di direzione dello stabilimento stesso.

Ci sono, infine, i sistemi ERP, che supportano la pianificazione delle risorse effettuata dalla direzione aziendale: ciò può includere funzioni differenti, come la gestione degli acquisti e dei magazzini e la pianificazione delle operazioni, della produzione e delle vendite.

Una delle sfide più importanti è quella di integrare sempre meglio questi sistemi, favorendo la comunicazione all'interno delle diverse aree aziendali e aumentando l'efficacia dell'interazione tra persone e macchinari.

Integrazione e interconnessione sono i due concetti chiave dell'industria del futuro e presuppongono la disponibilità di una rete di comunicazione ben strutturata all'interno di un'organizzazione, che permette di collegare i processi manifatturieri a quelli di business. La necessità di trarre sempre più valore dai dati provenienti da un processo produttivo, mettendoli al centro dei processi decisionali, fa sì che la digitalizzazione e l'analisi intelligente dei dati acquistino un'importanza sempre maggiore. Una rete che consenta di scambiare in tempo reale le informazioni, in modo integro e affidabile, permette alle organizzazioni di rispondere rapidamente ad eventuali fluttuazioni della domanda di mercato, di ottimizzare l'utilizzo delle risorse e l'efficienza dei processi e, infine, di aumentare la produttività.

2.3 La simulazione nell'ingegneria della produzione

Il primo passo per realizzare una Smart Factory consiste nello studio del processo di produzione in esame. Tale studio inizia sempre con un'attività di osservazione e termina con analisi teoriche delle variabili osservate. Nel mondo contemporaneo, dominato da strumenti ICT, la simulazione è diventata uno strumento estremamente significativo per l'analisi dei sistemi [47]. Ad esempio, i modelli di simulazione sono utilizzati per ridurre il rischio di errore durante l'implementazione di cambiamenti all'interno di un sistema di produzione esistente. In particolare, la creazione di un Digital Twin può avere tre diversi obiettivi [47]:

- Capire i principi del funzionamento di un sistema e le sue proprietà, che sono difficili da stabilire sulla base di semplici analisi.
- Facilitare un processo decisionale riguardante un sistema di produzione già esistente e funzionante.
- Risolvere i problemi che nascono durante o prima dell'effettiva realizzazione di un sistema di produzione.

La produzione è caratterizzata sempre più dall'ampia varietà di prodotti e dalla riduzione del loro ciclo di vita e dei loro costi di produzione [47]. Il Digital Twin viene incontro a tutte queste esigenze, descrivendo “in modo realistico prodotto, prestazioni e produzione di una linea” [48], riducendo il time-to-market e garantendo un alto livello di flessibilità.

La simulazione, infatti, fornisce una risposta alla domanda su come il sistema di produzione reagirà a varie situazioni (scenari, alternative decisionali), analizzando le correlazioni tra i diversi fattori (variabili) che le influenzano. Dunque, consente di ridurre i costi sostenuti da un'impresa a causa di decisioni errate durante la fase di progettazione o modifica di una linea.

Gli svantaggi di un modello di simulazione sono i seguenti [47].

- Lungo tempo di preparazione del modello.
- Unicità del modello, la cui soluzione, spesso, non può essere utilizzata per analizzare altri problemi.
- Le soluzioni trovate non sono ottime in modo assoluto per tutte le condizioni.

Per quanto riguarda il primo punto, nonostante il tempo di costruzione del Digital Twin sia rilevante, esso permette di risparmiare tutto il tempo che l'impresa perderebbe nel rimediare agli errori commessi in fase di progettazione e pianificazione, dovuti a delle decisioni prese basandosi su strumenti meno affidabili rispetto alla simulazione.

La simulazione viene effettuata essenzialmente per due motivi: simulare un sistema già esistente, in cui condurre una simulazione nel sistema reale è troppo costoso o impossibile, oppure simulare un sistema ancora in fase di progettazione.

2.4 SimTec: Simulation Technologies



La SimTec (Simulation Technologies), azienda in cui è stata realizzata la tesi, è una società di consulenza che vanta un'ampia esperienza nel campo dell'automazione industriale e delle tecniche di simulazione dei flussi produttivi, logistici e informativi. Essa si concentra, in

particolar modo, sulla qualità dei processi produttivi, monitorando le diverse attività e stazioni di lavoro in ogni fase della produzione.

Siemens Solutions Partner PLM dal 2015, la SimTec offre ai suoi clienti delle soluzioni complete nell'ottica Digital Factory. Centrali, nello scenario di integrazione e interconnessione descritto nel Paragrafo 2.2, sono proprio i software PLM forniti da Siemens, che fungono da strumenti di integrazione, dando la possibilità di generare un "digital twin" dell'impianto o, in generale, del prodotto da realizzare. Essi forniscono la possibilità di lavorare su una "realtà virtuale", utilizzando tutti i dati provenienti dai diversi processi relativi al prodotto stesso. Tale strumento va a ridurre non solo i costi di coordinamento e quelli dovuti agli errori, ma anche i costi associati ad eventuali realizzazioni di prototipi.

La SimTec si posiziona all'interno del grande settore della consulenza e può considerarsi l'azienda italiana con la maggiore esperienza nei software di simulazione sviluppati da Siemens Industry Software. In particolare, il software di simulazione utilizzato è Tecnomatix Plant Simulation, le cui caratteristiche saranno approfondite all'interno del terzo capitolo.

Essa si distingue fornendo un servizio unico ed innovativo al cliente, grazie all'unione tra l'esperienza (maturata in aziende come Comau, ABB e ArcelorMittal), che

costituisce un punto di riferimento essenziale, e l'innovazione. Quest'ultima è resa possibile da un team di giovani ingegneri che permettono alla SimTec di non limitarsi all'esperienza e alle tecniche utilizzate in passato, ma di trovare soluzioni sempre nuove che possano aprire nuove strade e nuovi sviluppi nel campo dell'Industria 4.0 e dell'ottimizzazione dei flussi produttivi, logistici e organizzativi. L'azienda è, infatti, caratterizzata da un'età media dei dipendenti di 30 anni, ed inoltre è stata riconosciuta per diversi anni all'interno delle Imprese Innovative del Piemonte.

La SimTec supporta aziende di varie dimensioni e diversi settori, in Italia e all'estero, attraverso quattro principali servizi: la simulazione di flusso, l'analisi dell'ergonomia, l'implementazione della metodologia World Class Manufacturing e, infine, la vendita dei Software Siemens e i relativi corsi di formazione.

A rafforzare la posizione della SimTec all'interno del mercato, intervengono diverse partnership. Tra di esse, di fondamentale importanza, è quella con CSMT, impresa di circa trenta dipendenti fondata nel 2007. Con tale partnership la specializzazione della SimTec nell'ottimizzazione dei flussi produttivi mediante software PLM Siemens, si unisce alla specializzazione nell'innovazione gestionale, nella ricerca applicata e nelle reti di automazione della CSMT. Grazie all'unione di queste competenze, SimTec può sfruttare un maggiore grado di integrazione verticale interfacciando i propri modelli di simulazione con software di gestione ERP, MES, SCADA e PLC, garantendo, così, una maggiore attenzione per l'acquisizione e il monitoraggio dei dati relativi alla supply chain e alla manutenzione degli impianti.

Un'altra partnership, molto significativa, è quella con Team3D, un'azienda che offre soluzioni CAD, CAM, CAE e PLM di Siemens Industry Software. SimTec si garantisce così la possibilità di accesso completo alla gamma di prodotti Siemens che le permettono di offrire un supporto a 360 gradi ai clienti, riuscendo a soddisfare anche le richieste più complesse.

I clienti della SimTec, inizialmente legata al settore automotive, spaziano in molteplici realtà produttive, tra cui quella metallurgica, l'industria metalmeccanica, l'industria tessile, il settore agroalimentare e quello energetico. Tra le principali aziende per cui la SimTec ha svolto progetti durante il mio periodo di tirocinio figurano FCA, Ferrari, Electrolux, BMW, CNH e Ferrero. La SimTec aiuta le aziende a riprogettare l'organizzazione dei processi produttivi, individuando tutti quei processi a scarso valore aggiunto, che possono essere automatizzati e gestiti con strumenti PLM, migliorando anche la comunicazione delle informazioni tra le diverse funzioni organizzative.

La metodologia di analisi di un processo produttivo messa in atto dalla SimTec si articola in cinque diverse fasi.

Fase 1 – Raccolta dati di input. Tutto parte con una visita in loco per analizzare in modo approfondito e accurato il processo produttivo in esame o una sua fase. Lo studio viene effettuato insieme al cliente per ottenere una descrizione chiara e dettagliata dei flussi produttivi, delle caratteristiche fisiche delle attrezzature di lavoro e dei mezzi di trasporto, delle prestazioni di ogni risorsa (velocità, tempi di lavoro, affidabilità, ecc.) e delle logiche di funzionamento che guidano il processo. È necessario, inoltre, il layout dell’area e delle risorse in questione, che servirà come base per la creazione dell’ambiente virtuale.

Fase 2 – Analisi ed elaborazione dei dati di input. Si devono analizzare i dati forniti dal cliente, risolvendo eventuali incongruenze, ed elaborarli per ottenere tutte le informazioni necessarie per la costruzione del modello. Ad esempio, la disponibilità di ogni stazione di lavoro può essere ottenuta tramite l’elaborazione dei dati dei *borderò* automatici o semi-automatici di cui dispone il cliente, oppure, in assenza di questi ultimi, tramite lo studio dei dati storici di ogni macchinario o componente di cui dispone SimTec. È necessario definire anche le specifiche tecniche di ogni risorsa produttiva di cui si dovrà riprodurre il funzionamento reale all’interno del software di simulazione, traducendo ogni caratteristica in un attributo riconoscibile dal software stesso. In questa fase, inoltre, si trasformano le richieste del cliente in precise specifiche tecniche per definire in maniera chiara quali saranno gli obiettivi del progetto. Alcuni esempi sono il calcolo dell’efficienza tecnica di linea, l’ottimizzazione del lead time, l’analisi delle criticità in base ai diversi mix di prodotti, il dimensionamento dei contenitori in linea (quantità e dimensione) e dei mezzi di movimentazione, l’analisi dei Work in Process e Work in Progress (WIP), e molti altri ancora.

Fase 3 – Implementazione del modello di simulazione. La modellazione vera e propria consiste nella creazione di un Digital Twin del sistema produttivo da esaminare, cioè una sua copia virtuale, su cui poter effettuare le diverse analisi. La simulazione può essere effettuata per un prodotto manifatturiero, per una singola lavorazione o per un intero processo produttivo. Dopo aver analizzato i risultati, si formulano delle conclusioni, e determinare le “debolezze” in termini di prestazioni, e, se necessario, si propongono al cliente nuove logiche di gestione e modifiche dell’impianto per ottimizzarlo. Di solito vengono implementati diverse scenari di uno stesso sistema di produzione al fine di confrontare i risultati di ognuno e scegliere quello migliore dal punto di vista dell’efficienza e della produttività.

Fase 4 – Creazione dell’interfaccia utente. La SimTec prevede la creazione di un’interfaccia utente, cioè un menù, intuitivo e semplice da utilizzare, che permette al cliente di interagire con il modello di simulazione andando a modificare alcuni parametri, in modo che egli può testare autonomamente differenti scenari in base alle proprie esigenze.

Fase 5 – Formazione e supporto hotline. La SimTec si preoccupa di formare il cliente finale sull’utilizzo del software di simulazione, sull’interfaccia e sugli oggetti di libreria specifici creati per esso, ed inoltre continua a fornire supporto qualora si presentino delle problematiche durante l’utilizzo del modello.

La fase di lavoro più critica è sicuramente quella che precede la creazione del Digital Twin. Infatti, prima della scrittura dei codici che permettono di implementare ogni logica stabilita, è necessario uno studio approfondito del processo di produzione, che consenta di definire a priori eventuali problematiche, che saranno, poi, smentite o confermate dalla simulazione. Questo passaggio consente anche di risparmiare tempo, indirizzando il modello di simulazione verifica delle criticità rilevate. Dunque, il vero know-how dell’azienda non risiede nell’abilità di programmazione o nell’utilizzo del software di simulazione, ma nella capacità di analisi critica del processo in esame.

Capitolo 3

Caso studio

Il terzo capitolo si concentra sulla creazione di un Digital Twin di un processo di lavorazione di un albero motore (Crankshaft). Il modello virtuale, creato su commissione di un'azienda cliente di SimTec, sarà realizzato attraverso il software di simulazione Plant Simulation. Lo scopo è quello di analizzare scenari diversi in base al mix produttivo, sulla base della produttività, dell'eventuale presenza di colli di bottiglia e dei consumi energetici dell'impianto. Il focus verrà posto proprio sull'aspetto energetico, per verificare le eventuali differenze tra possibili configurazioni e per dimensionare la potenza energetica necessaria al sistema, nell'ottica di una valutazione del Life Cycle Cost del sistema stesso.

3.1 Analisi di un sistema

Il processo produttivo studiato prende il nome di *sistema*. Un sistema è definito come un insieme di entità, persone o macchine, che interagiscono insieme per il raggiungimento di un fine logico [49]. Le cosiddette entità sono caratterizzate da vari attributi di diversa natura, che dipendono dallo stato del sistema, il quale può variare in ogni istante in relazione agli eventi che si susseguono. Si definisce “stato del sistema” quell'insieme di variabili necessarie per descrivere un sistema in un momento particolare, in relazione agli obiettivi di uno studio [24]. Al fine di effettuare un'analisi del sistema dal punto di vista scientifico, è necessario fare delle assunzioni sul modo in cui esso lavora. Queste assunzioni sono, di solito, delle espressioni matematiche o delle relazioni logiche e costituiscono un modello, utilizzato per cercare di capire come si comporta il sistema. Se le diverse relazioni che compongono il modello sono abbastanza semplici, allora è possibile utilizzare metodi matematici che permettono di trovare una soluzione analitica alle diverse domande.

La maggior parte dei sistemi del mondo reale sono, però, troppo complessi per essere studiati attraverso metodi analitici.

Un sistema di produzione è definito, infatti, come una struttura complessa caratterizzata da diverse regole da seguire e vari obiettivi da raggiungere tenendo conto dei molteplici vincoli imposti dall'ambiente esterno [35]. Tali sistemi, durante la loro vita, hanno bisogno di adattarsi continuamente alle mutevoli esigenze del mercato, aumentando il livello di personalizzazione dei prodotti, riducendo i tempi ciclo delle attività e mantenendo un elevato livello qualitativo a costi inferiori. Per raggiungere questi obiettivi, è necessario, in fase di progettazione di un impianto, considerare gli aspetti di riconfigurabilità e di flessibilità. In accordo alla definizione di Wiendahl [50], un sistema di produzione è riconfigurabile quando alcuni suoi componenti possono essere aggiunti, rimossi o migliorati, al fine di modificare il comportamento del sistema stesso in risposta alla domanda del mercato, mentre, un sistema è flessibile quando è in grado di produrre un'ampia gamma di prodotti diversi a partire da una stessa unità di base. Il trade-off tra riconfigurabilità e flessibilità è una delle sfide più rilevanti durante la progettazione di un impianto. Infatti, di solito, un sistema flessibile è difficile da riconfigurare e viceversa [35].

Nell'ambito specifico della simulazione, tali sistemi complessi sono composti da molteplici elementi, ciascuno caratterizzato da diverse liste di *records*, cioè insiemi di attributi di tipo diverso, ognuno con un proprio nome e un preciso valore (ad esempio un numero reale, un numero intero, una stringa, un oggetto, e così via). Una lista di *records* può essere memorizzata all'interno di una matrice, in cui ogni riga corrisponde ad un *record* e ogni colonna ad un attributo. In questi casi, è necessario ricorrere alla simulazione, che permette di registrare e di gestire efficientemente questa grande quantità di informazioni.

La simulazione è ampiamente utilizzata soprattutto per i sistemi di produzione. Secondo Law e Kelton [24], le ragioni di una sua maggiore applicazione in ambito manifatturiero rispetto ad altri ambiti, è dovuta alle seguenti ragioni.

- L'aumento della concorrenza ha focalizzato l'attenzione delle industrie sull'automazione per migliorare la produttività e la qualità.
- Il costo delle attrezzature e degli impianti di produzione può essere molto elevato, dunque, prima di effettuare un investimento, sono necessarie analisi molto precise.
- I software di simulazione migliorano sempre di più, riducendo il tempo di creazione di un modello e il tempo di esecuzione della simulazione, e ciò permette di effettuare analisi in tempi molto più brevi.

- La disponibilità di un'animazione grafica si traduce in una maggiore comprensione e possibilità di utilizzo del software da parte dei managers di linea.

Il maggior beneficio derivante dall'uso della simulazione è sicuramente la possibilità di avere una visione complessiva del sistema, che permette di comprendere qual è l'impatto che un cambiamento locale, ad esempio in una determinata stazione di lavoro, ha sull'intero processo produttivo.

3.1.1 Simulazione ad eventi discreti: Plant Simulation

Oggigiorno il mercato offre molti strumenti per la simulazione. Garwood et al. [51] hanno condotto uno studio che riassume i diversi software di simulazione applicabili all'analisi del consumo di energia nei diversi ambiti industriali. La Figura 3.1 mostra quali di questi strumenti hanno la potenzialità di effettuare il calcolo dei consumi energetici a differenti livelli (macchinario, processo, impianto) e di stabilire una connessione tra le varie fasi di un processo produttivo.

Simulation tools	Open source	Degree of energy analysis			Connection between layers
		Machine	Process	Plant	
AnyLogic	N	Y	Y	Y	N
Arena	N	Y	Y	Y	N
Autodesk Green Building Studio	N	N	N	Y	Y
Autodesk Revit	N	N	N	Y	Y
BuildOpt-VIE	N	N	Y	Y	Y
DELMIA	N	Y	Y	Y	N
DesignBuilder	N	N	N	N	N
ecoinvent	Y	N	N	N	N
EnergyPlus Simulation Engine	Y	N	Y	Y	Y
ESP-r	Y	N	Y	Y	Y
eQUEST	Y	N	Y	Y	Y
FlexSim	N	Y	Y	Y	N
HKSim	N	N	N	Y	N
IBPT	Y	N	Y	Y	Y
IDA ICE	Y	N	N	Y	Y
IES VE	N	N	Y	Y	Y
Microsoft Excel	N	Y	Y	Y	Y
Modelica Buildings Library	Y	Y	Y	Y	N
Plant Simulation	N	Y	Y	Y	N
Sefaira	N	N	N	Y	Y
SIMFLEX/3D	N	Y	Y	N	N
Simio LLC	N	Y	Y	Y	N
SIMUL8	N	Y	Y	Y	N
Simulink e MATLAB	N	Y	Y	Y	N
TRACE 700	N	N	N	Y	N
TRNSYS	N	N	N	Y	Y
WITNESS	N	Y	Y	N	Y

Figura 3.1: Programmi di simulazione e loro potenzialità [51]

Il software di simulazione, utilizzato per modellizzare il *Digital Twin* oggetto della tesi, è Tecnomatix Plant Simulation di Siemens Industry Software. Esso è un software non *open source* e che non permette il collegamento tra differenti modelli di simulazione, ma consente un'ottima rappresentazione dei profili energetici a tutti i livelli del processo produttivo. La scelta è data soprattutto dal fatto che, rispetto agli altri strumenti presenti sul mercato, Plant Simulation è caratterizzato da una grande flessibilità nella costruzione e nell'utilizzo del modello [38]. Infatti, esso offre

una vasta libreria di oggetti preimpostati, come ad esempio una singola stazione di processo, un trasportatore, un magazzino e così via. Inoltre, il linguaggio di programmazione al suo interno, SimTalk, è Object-Oriented (OO).

La programmazione OO permette di definire degli oggetti che sono in grado di interagire gli uni con gli altri attraverso lo scambio di informazioni, grazie all'implementazione di logiche specifiche. Tali oggetti sono dotati di ereditarietà, polimorfismo e struttura gerarchica [35]. L'ereditarietà, in particolare, consente ad ogni oggetto di mantenere le caratteristiche della cosiddetta *Classe* di appartenenza. Tutte le Classi sono contenute all'interno delle librerie di Plant Simulation. Ogni oggetto, utilizzato per la costruzione del modello, appartiene ad una determinata Classe e prende il nome di *Istanza*. L'esistenza di una precisa struttura gerarchica fa sì che, modificando le caratteristiche di una singola *Istanza*, quelle della Classe di appartenenza rimangano invariate. Infine, il polimorfismo è legato al concetto di ereditarietà e si riferisce al fatto che un metodo, o, in generale, una proprietà di un oggetto, definito all'interno di una Classe, può assumere valori o restituire risultati diversi a seconda dell'istanza in cui viene richiamato. In virtù del polimorfismo, gli oggetti appartenenti ad una stessa Classe, dispongono di una stessa interfaccia, che può essere implementata in modo diverso in base alle necessità. Ogni oggetto nelle librerie segue il paradigma OO e gli utenti hanno la possibilità di sviluppare nuovi oggetti, unendo o modificando le proprietà di quelli già esistenti [35]. Un nuovo oggetto creato può diventare a sua volta una Classe, da cui è possibile, poi, sviluppare le Istanze necessarie alla costruzione del modello.

Un'altra motivazione dell'utilizzo di Plant Simulation per il lavoro sviluppato nella tesi, è l'esistenza, al suo interno, di uno specifico modulo per l'analisi dei consumi energetici [25]. Tale modulo, che sarà meglio descritto nei Paragrafi 3.5.2 e 3.8, consente la definizione dei profili di carico dei diversi macchinari di lavoro, dopo l'inserimento dei parametri riguardanti l'erogazione di potenza media nelle loro diverse fasi di funzionamento.

Plant Simulation è utilizzato per modelli di simulazione dinamici ad eventi discreti (*Discrete-event simulation models*), siano essi stocastici o deterministici. Tale tipo di simulazione potrebbe essere effettuata anche manualmente, ma la quantità di dati da gestire per i sistemi reali impone che tali simulazioni vengano svolte con dei software specifici.

Un "evento" è definito come un qualcosa che accade, in un istante di tempo, che potrebbe cambiare lo stato del sistema [24]. Il "potrebbe" è dovuto al fatto che, nei modelli di simulazione, esso può anche essere utilizzato per scopi che non hanno a che fare con il cambiamento. Per esempio, l'accadere di un determinato evento,

può essere utilizzato per prendere una determinata decisione sul funzionamento del sistema in un particolare momento e potrebbe non comportare effettivamente un cambiamento dello stato del sistema.

A causa della natura dinamica del modello di simulazione, è importante tener traccia del tempo simulato. In Plant Simulation ciò avviene grazie ad un oggetto chiamato *Event Controller*. Esso è un orologio di simulazione, che viene inizializzato ogni volta che si avvia la simulazione e che ne coordina gli eventi che si succedono [52].

Cliccando sul *button* “Time” (Figura 3.2) si può decidere se far partire la simulazione in una data specifica oppure semplicemente a tempo zero. La data specifica, poi, può essere impostata nella scheda *Settings* (Figura 3.2). In tale schermata devono essere definiti anche la durata della simulazione (End) e il tempo di warm-up (Statistics), che indica la fine del transitorio, istante in cui il software può iniziare a generare le statistiche richieste. Per la valutazione della simulazione sono, infatti, necessari i dati statistici raccolti da tutti gli oggetti che compongono il flusso di materiale rappresentato e, per avere una stima corretta delle diverse variabili che si intendono esaminare, è necessario che le relative statistiche siano prodotte soltanto in seguito al riempimento del sistema: infatti, la linea produttiva, nell’istante iniziale della simulazione, è interamente vuota e una statistica calcolata a $t = 0$ terrebbe conto di un’inefficienza naturale.

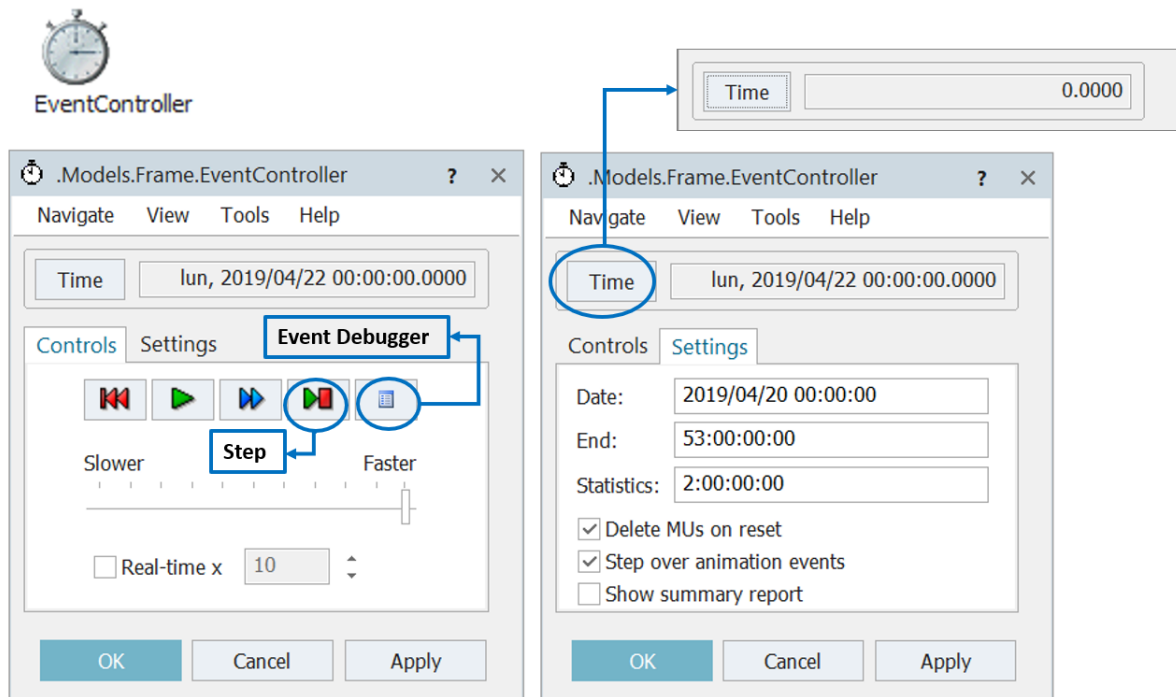


Figura 3.2: Event Controller di Tecnomatix Plant Simulation

Nell'esempio in Figura 3.2, la simulazione dura in tutto 53 giorni, ma le statistiche sono calcolate a partire dal secondo giorno in poi (quindi gli oggetti registreranno dati statistici per 51 giorni): in tal modo, il primo giro di occupazione delle linee produttive non influenzerà le statistiche finali.

La scheda *Controls* dell'EventController (Figura 3.2), invece, contiene i comandi per avviare, stoppare, resettare la simulazione e stabilirne la velocità di esecuzione. Con il *button* "Step" si può far procedere la simulazione *step by step* poiché, in questo modo, si processa un solo evento alla volta. La simulazione, essendo ad eventi discreti, di solito, salta da un evento all'altro senza aspettare il tempo che trascorre tra di essi; ma, cliccando la casella *Real-time x*, l'Event Controller esegue la simulazione anche durante questo intervallo di tempo, includendo un'animazione grafica nonostante non accadono degli eventi veri e propri e, nella casella di fianco, si può stabilirne la velocità.

Infine, cliccando su *Event Debugger* si apre una tabella in cui, durante l'esecuzione della simulazione, si generano tutti gli eventi che si susseguono nel tempo, ciascuno identificato in una riga della tabella con una serie di attributi, tra cui il tipo di evento e l'istante di tempo in cui esso si realizza. Ad esempio, quando un'entità entra in una stazione di lavoro, Plant Simulation calcola il tempo che impiega l'entità ad essere processata e registra tale evento e tale tempo all'interno di questa lista (in particolare registra l'istante di uscita dalla stazione).

L'intero modello di simulazione viene inizializzato a tempo zero con un metodo principale chiamato "Init" che richiama l'intera routine di inizializzazione. A tempo $t = 0$, oltre all'inizializzazione dello stato del sistema, si azzerano tutte le statistiche. All'avanzare del tempo di simulazione, si realizzano i diversi eventi e, alla fine, al termine della simulazione, viene generato un *report* che mostra una stima delle misure di prestazione del sistema.

Il modello di simulazione è formato da oggetti che interagiscono gli uni con gli altri mentre la simulazione evolve nel tempo. Ogni oggetto contiene dati, che ne descrivono lo stato in un determinato momento, e metodi, che descrivono le azioni che l'oggetto esegue quando si realizzano determinate condizioni.

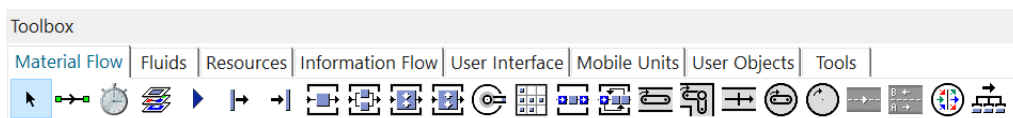


Figura 3.3: Toolbox di Tecnomatix Plant Simulation

Centrale, nell'utilizzo di Plant Simulation, è la *toolbox* (Figura 3.3), da cui possono essere selezionati i diversi oggetti e trascinati all'interno dell'area di lavoro, detta *frame*.

All'interno del *frame*, si possono rappresentare i diversi macchinari di lavorazione che formano le varie linee di produzione, che a loro volta si uniscono per rappresentare l'intero impianto. Come illustrato in Figura 3.4, infatti, ogni impresa può essere scomposta in diversi livelli gerarchici, il cui ultimo livello è formato dai macchinari che compiono le lavorazioni sui prodotti.

Attraverso gli oggetti del “Material Flow” (Figura 3.3), dunque, si possono rappresentare nel dettaglio tutti gli elementi del flusso produttivo, come stazioni di lavoro, strade, mezzi di movimentazione, e così via.

Le singole stazioni di lavoro sono denominate “SingleProc” e possono essere collegate tra di loro tramite dei connettori che indicano la direzione del flusso di entità.

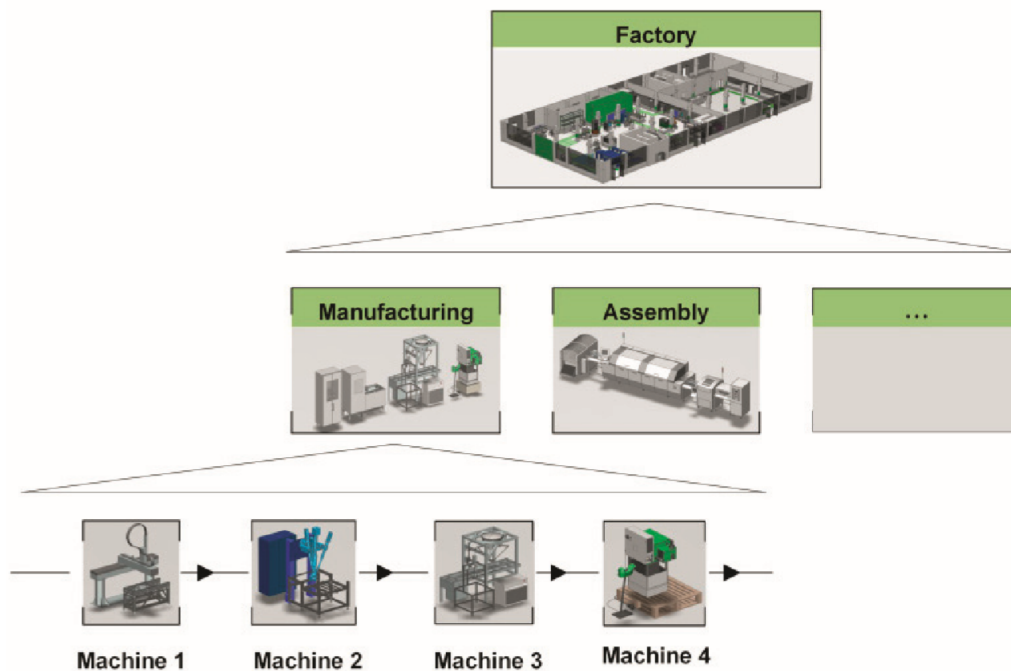


Figura 3.4: Divisione gerarchica di un impianto di produzione [31]

Per entità, in questo caso, si intende qualsiasi prodotto o pezzo che viene lavorato dal sistema produttivo. Le entità si distinguono le une dalle altre per i loro attributi, cioè delle precise informazioni memorizzate al loro interno. Un'entità, per muoversi all'interno del sistema simulato, richiede l'utilizzo di risorse. Se una determinata risorsa richiesta non è disponibile, allora l'entità deve attendere, la stazione in cui si trova continua ad essere occupata e può generarsi una “coda”.

All'inizio del flusso produttivo è necessario posizionare una *Source* (Figura 3.5), cioè una sorgente che genera entità, dette anche MUs nel linguaggio di programmazione del software. La *Source* può produrre le stesse o differenti tipi di entità, una dopo l'altra, secondo un mix produttivo o seguendo una determinata sequenza ciclica. Si deve stabilire, dunque, la logica di generazione e l'intervallo di tempo con cui le entità sono introdotte nel sistema. L'entità, una volta creata, si muove direttamente nell'oggetto al quale la sorgente è collegata (avendo la *Source* capacità uno e tempo di processo nullo). Come è necessario inserire una *Source* per generare il flusso di materiali, allo stesso modo si deve inserire un *Drain* (Figura 3.5) per rimuovere le entità quando esse finiscono di essere lavorate e devono uscire dal sistema.

Con un doppio click su un qualsiasi oggetto della *toolbox*, che è stato posizionato sul frame, si apre una finestra di dialogo che consente di inserire tutte le informazioni e le specifiche di quell'oggetto, come ad esempio il tempo di processo riferito ad una stazione di lavoro oppure la velocità di un sistema di trasporto.

Un *processo* è una sequenza ordinata (rispetto al tempo) di eventi interconnessi, separati da intervalli di tempo, che descrive l'intera esperienza di un'entità mentre attraversa un sistema [24].

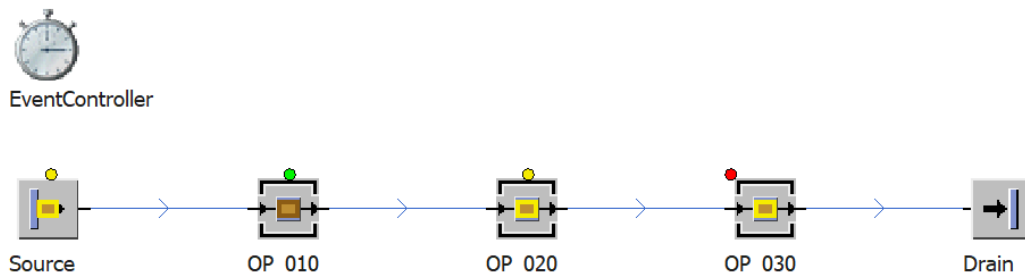


Figura 3.5: Esempio di un modello in Plant Simulation

Di estrema importanza è l'animazione grafica del Digital Twin, poiché suggerisce miglioramenti delle procedure operative, in quanto alcuni problemi del sistema esaminato possono non essere rilevati soltanto tramite la lettura delle statistiche di output, ma è necessario osservare attentamente il modello durante l'esecuzione della simulazione. Ad esempio, come si vede in Figura 3.5, l'animazione suggerisce lo stato di una stazione di lavoro a seconda del colore del *semaforo* sopra di essa: la stazione OP_010 sta lavorando (luce verde), la stazione OP_030 è in guasto (luce rossa) e la stazione OP_020, proprio a causa del guasto della stazione successiva, ha già finito di lavorare ed è in attesa di scaricare il pezzo lavorato (luce gialla).

In questo modo è possibile visualizzare a livello grafico se sorgono dei colli di bottiglia, se una stazione si guasta o se ci sono punti in cui il sistema si svuota troppo in fretta provocando un'attesa per mancato carico delle stazioni di lavoro. Inoltre, durante l'esecuzione della simulazione, è possibile visualizzare statistiche e grafici dinamici, necessari, ad esempio, per tenere sotto controllo la quantità di entità presenti in un buffer tra una stazione e l'altra. Tutti questi strumenti facilitano l'analisi del modello e dei relativi dati di output.

Le informazioni generali, fornite in questo paragrafo e relative alla costruzione di un modello digitale all'interno di Plant Simulation, possono essere approfondite nel libro di Bangsow [52], che costituisce un vero e proprio manuale di utilizzo del software. Altrettanto utile e, forse, di più immediato utilizzo, è anche la guida presente all'interno del software stesso, in cui è possibile trovare spiegazioni dettagliate ed esempi sull'utilizzo degli oggetti di libreria e del linguaggio di programmazione SimTalk, attraverso il semplice inserimento di "parole chiave".

3.2 Metodologia di sviluppo del Digital Twin

La creazione del modello rappresenta solo una piccola fase all'interno del processo di progettazione e analisi di un sistema complesso attraverso la simulazione.

La metodologia proposta in questa tesi, rielaborata a partire da quella definita da Law e Kelton [24], divide tale processo in diverse fasi, elencate di seguito.

- Definizione degli obiettivi e pianificazione dello studio.
- Collezione dei dati e definizione del modello.
- Verifica della validità concettuale del modello.
- Implementazione del modello e debug.
- Verifica della validità del modello di simulazione.
- Progettazione degli esperimenti.
- Esecuzione della simulazione ed analisi dei dati di output.

3.3 Obiettivi dell'analisi

La definizione degli obiettivi relativi allo studio del sistema, oggetto di questa tesi, è stata valutata in sede di riunione della Sim.Tec. con un'azienda leader a livello mondiale nella progettazione, costruzione ed installazione di impianti produttivi, specifici per il settore Automotive. A tale azienda è stato commissionato il progetto di *retooling* di un impianto di lavorazione di alberi motore. Gli obiettivi sono quelli di verificare se i diversi componenti presenti nel sistema, cioè stazioni di lavoro e sistemi di trasporto, interagiscono effettivamente tra di loro per produrre il *throughput* desiderato, e definire il consumo energetico complessivo.

Per svolgere questo compito, in seguito alla molteplicità di dati da gestire ed in seguito agli ingenti investimenti che il cliente finale dovrà sostenere in caso di effettiva modifica dell'impianto, l'azienda ha deciso di ricorrere alla simulazione.

Gli scopi specifici dell'analisi sono i seguenti.

- Testare la produttività dell'impianto
- Determinare eventuali colli di bottiglia
- Dimensionare i consumi energetici dell'impianto

Il sistema in esame dovrà produrre due diversi tipi di alberi motore, A e B, di cui le Figure 3.6 e 3.7 rappresentano degli schemi esemplificativi.

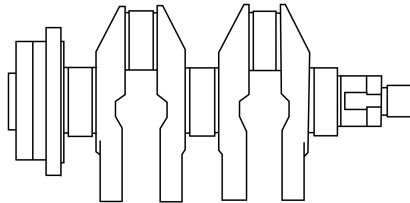


Figura 3.6: Schema esemplificativo dell'albero motore di tipo A

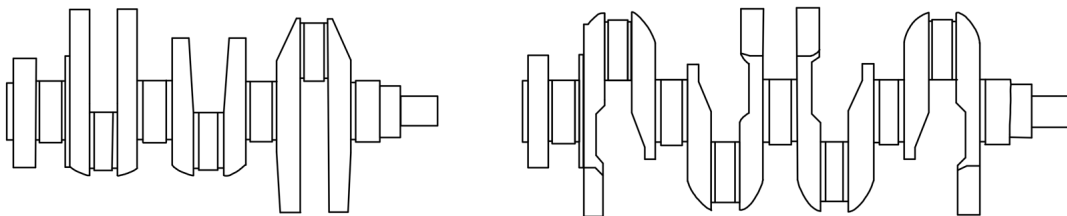


Figura 3.7: Schemi esemplificativi degli alberi motore di tipo B nella varianti B1 (sinistra) e B2 (destra)

Essi richiedono lavorazioni diverse tra loro e, quindi, seguiranno un proprio percorso all'interno del sistema. Inoltre, come si evince dalla Figura 3.7, del tipo B si produrranno due varianti, B1 e B2.

Su richiesta dell'azienda, sarà effettuata l'analisi di tre diversi scenari di simulazione caratterizzati da un diverso mix produttivo. Inoltre l'impianto è caratterizzato, in alcuni tratti, da due flussi produttivi paralleli, detti $FLOW_1$ (flusso 1) e $FLOW_2$ (flusso 2).

Per flusso produttivo si intende una sequenza di operazioni in serie che compiono diverse lavorazioni sul flusso di materiale, cioè sui semilavorati in input che devono essere trasformati nei desiderati prodotti finali. I due flussi appena menzionati, saranno meglio compresi in seguito, durante la descrizione del layout del sistema (Paragrafo 3.4.1). Per ogni scenario produttivo, bisognerà stabilire in quale flusso dovrà entrare ogni entità generata dalla sorgente.

Nelle tre Tabelle 3.1, 3.2 e 3.3, sono schematizzati i tre scenari, di seguito descritti.

- Scenario 1: il mix produttivo è caratterizzato per il 50% dall'albero motore di tipo B2 e per il 50% dall'albero motore di tipo A, di cui il tipo B2 è indirizzato totalmente sul flusso 1 ed il tipo A totalmente sul flusso 2.
- Scenario 2: il mix produttivo è caratterizzato per il 50% dall'albero motore di tipo B2 e per il 50% dall'albero motore di tipo B1, di cui il tipo B2 è indirizzato totalmente sul flusso 1 ed il tipo B1 totalmente sul flusso 2.
- Scenario 3: il mix produttivo è caratterizzato per il 100% dall'albero motore di tipo B2, indirizzato per il 50% su un flusso e per il 50% sull'altro.

Oltre ai tre scenari prestabiliti, si è deciso di creare un modello che dia la possibilità all'azienda di impostare il proprio scenario con qualsiasi tipo di mix produttivo, semplicemente compilando una tabella simile a quelle illustrate nella pagina seguente.

Dunque si dovrà implementare un'interfaccia che permetterà all'utente di inserire facilmente i diversi parametri di input del modello. Esiste, per esigenze di questo tipo, anche una versione run-time del software di simulazione, che consente di impostare i parametri attraverso l'interfaccia, eseguire le simulazioni e visualizzare il report in cui sono generate le statistiche di output, senza poter interagire direttamente con il modello e modificarne la logica.

Tabella 3.1: Scenario 1

	Mix	% $FLOW_1$	% $FLOW_2$
A	50	0	100
B1	0	0	0
B2	50	100	0

Tabella 3.2: Scenario 2

	Mix	% $FLOW_1$	% $FLOW_2$
A	0	0	0
B1	50	0	100
B2	50	100	0

Tabella 3.3: Scenario 3

	Mix	% $FLOW_1$	% $FLOW_2$
A	0	0	0
B1	0	0	0
B2	100	50	50

3.4 Dati di input del modello

Il primo passo verso la costruzione del modello è la raccolta di informazioni sul layout del sistema, sul flusso di materiale e sulle varie procedure operative, in presenza di personale esperto dell'impianto in questione. Tutte le informazioni raccolte devono essere analizzate con spirito critico, elaborate e filtrate, al fine di selezionare quelle utili, anche in base al livello di dettaglio con cui si vuole costruire il modello. Tale livello di dettaglio dipende innanzitutto dagli obiettivi di progetto e dalla disponibilità effettiva dei dati, ma anche da vincoli dovuti al software di simulazione e da vincoli temporali ed economici [24].

3.4.1 Schema logico dell'impianto

In Figura 3.8 è rappresentato lo schema a blocchi, costruito a partire dal layout del sistema, che descrive la dinamica del flusso produttivo, fornendo le indicazioni sui collegamenti presenti tra le stazioni di lavoro e sulle tipologie di prodotto che ogni stazione può processare.

Per stazione di lavoro si intende l'area occupata da un macchinario e, in generale, dall'attrezzatura e dagli operatori necessari per eseguire una determinata operazione di lavorazione sul prodotto o componente da processare.

I tre diversi prodotti, A, B1 e B2, che possono circolare nel sistema, nel modello di simulazione prenderanno il nome di entità. Ogni volta che un'entità si trova ad un bivio, deve scegliere in quale flusso dirigersi. Per una maggiore chiarezza, all'interno dello schema, il flusso 1 è contraddistinto dal colore rosa, mentre il flusso 2 dal colore verde. Come si può facilmente notare, l'entità A può dirigersi solo nelle stazioni appartenenti al flusso 2, mentre B1 e B2 sono processate dalle stazioni appartenenti ad entrambi i flussi.

I “cerchi arancioni” sono, invece, rappresentativi dei punti dell'impianto in cui viene svolto un Controllo Qualità. Tali operazioni avvengono su dei circuiti in movimento a velocità costante, che possono essere dimensionati e approssimati nel modello con dei buffer.

È importante sottolineare che, all'interno dello schema, le stazioni contraddistinte dallo stesso numero, sono stazioni in parallelo. Ad esempio, come rappresentato in Figura 3.9, un'entità di tipo B2 che si trova nella stazione 10 a sinistra dello *Start*, dovrà decidere, in base a delle logiche precise, in quale delle due stazioni 20 sarà più conveniente dirigersi.

Il resto dell'impianto sarà analizzato nel dettaglio più avanti, durante la costruzione del modello di simulazione e la definizione delle logiche che regolano i diversi bivi presenti nel sistema.

Per stabilire quali sono le possibili entità processate da ogni stazione, sono stati utilizzati i tempi ciclo forniti dall'azienda. Per ogni stazione i sono disponibili tre tempi ciclo $T_{i,A}$, $T_{i,B1}$ e $T_{i,B2}$, uno per ogni entità. Se un'entità j non è processata da una determinata stazione i , allora $T_{i,j}$ sarà uguale a zero.

Oltre ai tempi ciclo, sono resi disponibili anche i tempi di setup. Per ogni stazione, se si passa dal lavorare un'entità di tipo A ad una di tipo B e viceversa, allora sono necessarie operazioni per attrezzare la macchina e, dunque, prepararla per ricevere un'entità di tipo diverso da quella precedente. Invece, per quanto riguarda le due varianti del tipo B, se si passa da B1 a B2 e viceversa, il tempo di setup della stazione di lavoro è, per la maggior parte dei casi, nullo.

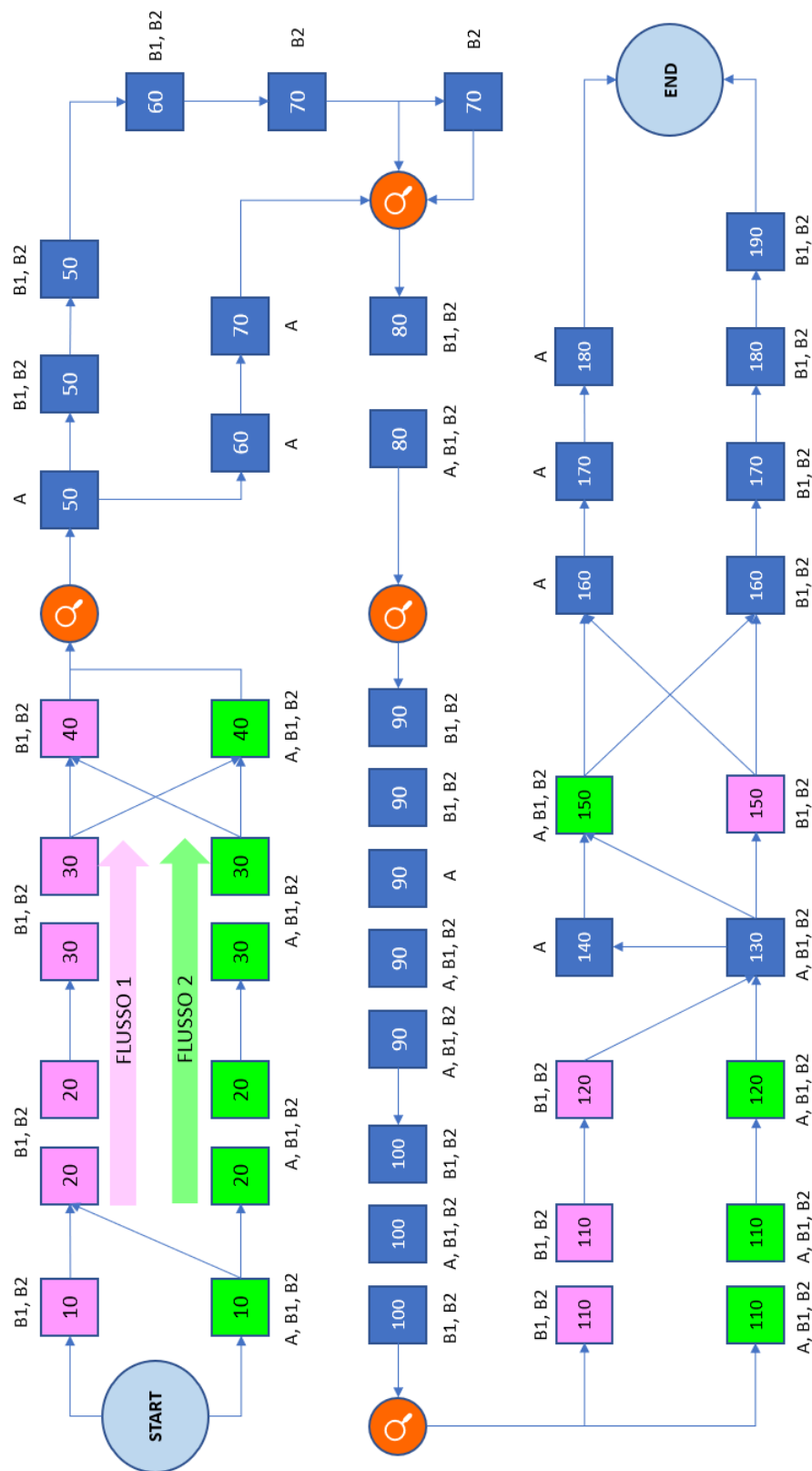


Figura 3.8: Schema a blocchi rappresentativo del flusso di materiale dell'impianto di lavorazione di alberi motore

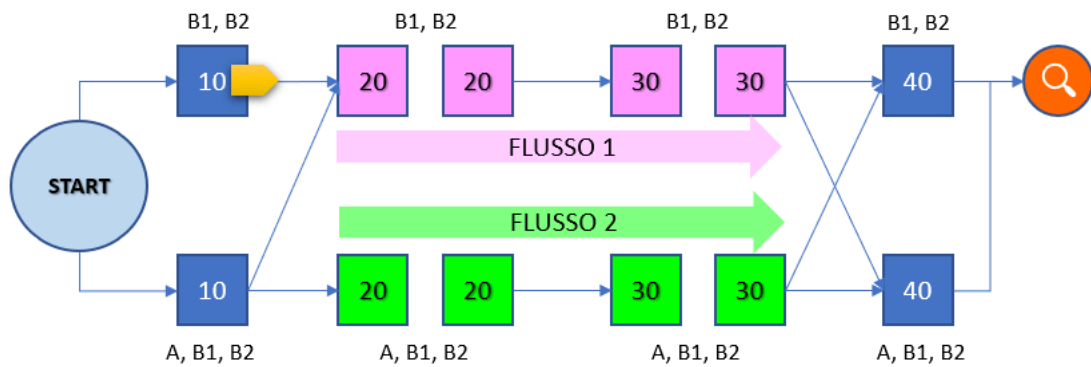


Figura 3.9: Particolare dello schema a blocchi dell'impianto

3.4.2 Sistemi di movimentazione

Come si vede dallo schema a blocchi (Figura 3.8), le diverse stazioni di lavoro sembrano essere disposte tutte in serie, per il semplice fatto che esse sono allineate tra loro. In realtà, a livello concettuale, due stazioni possono essere considerate in serie nel momento in cui un'entità viene lavorata in modo consecutivo da entrambe le stazioni, mentre possono essere considerate in parallelo quando l'entità sceglie di andare solo in una delle due, poiché esse hanno le stesse funzioni, cioè compiono lo stesso tipo di lavorazioni. Nel sistema, tra due gruppi di stazioni collegate in serie, sono presenti dei *buffer conveyors*, cioè dei nastri trasportatori che movimentano le entità e le trasportano fino all'ingresso di un gruppo di stazioni collegate in parallelo. Per il dimensionamento di tali buffer, è stata fornita dall'azienda la loro lunghezza e la velocità di attraversamento dell'entità.

All'ingresso delle stazioni è presente, poi, un altro sistema di movimentazione, il *gantry*, cioè un dispositivo di sollevamento aereo su cui scorre un carrello (Figura 3.10). Esso consiste in una trave metallica lunga e dritta supportata su due gambe, anch'esse metalliche, saldamente ancorate al pavimento. L'asse di spostamento lungo la trave viene comunemente denominato asse x. Il carrello si muove in questa direzione e supporta uno o più bracci di carico. Un gantry può essere dotato anche di carrelli multipli che operano separatamente con programmi di sicurezza ben precisi per evitare qualsiasi tipo di collisione.

I bracci di carico e scarico del gantry si muovono in direzione verticale lungo l'asse z, perpendicolarmente al piano in cui scorre il carrello, e sono dotati di unità di presa, dette *pinze*, necessarie per prelevare e depositare i carichi da lavorare. Tali pinze hanno di solito un profilo che si accoppia bene con l'area di manipolazione del pezzo.

Inoltre su ogni gantry sono presenti dei *drip tray buffer*. Essi sono dei veri e propri contenitori sopraelevati, posizionati al di sotto del binario su cui scorre il carrello, che possono ospitare, a seconda dei casi, i diversi tipi di entità divise in base al tipo e in base al loro stato, cioè se devono essere lavorate o se sono già state lavorate. Nello schema esemplificativo mostrato in Figura 3.10, il *drip tray buffer* è denominato “Gantry Buffer”.

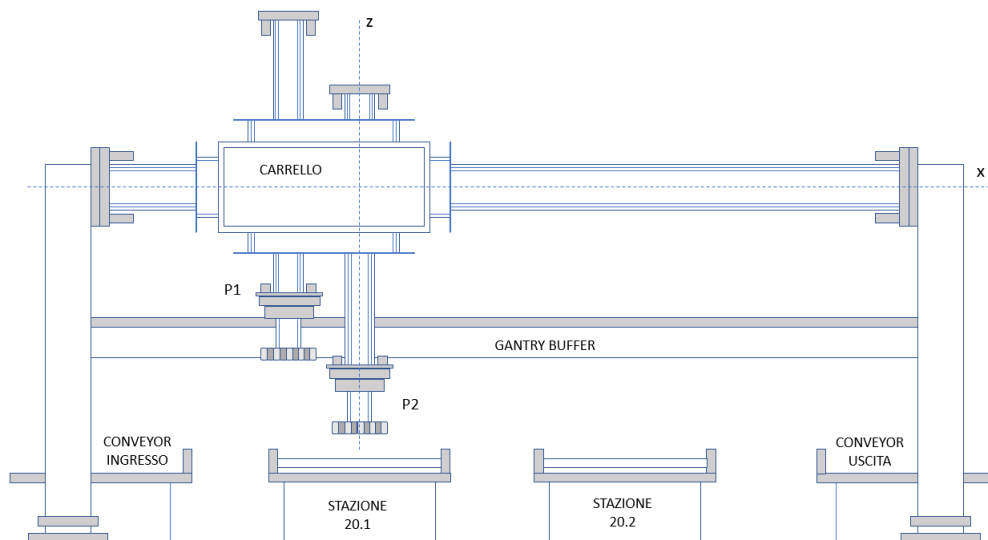


Figura 3.10: Rappresentazione concettuale di un gantry lineare

Per lo studio, l'azienda ha fornito i tempi di ogni singola movimentazione necessaria per il carico/scarico delle entità. Tali informazioni, come anche i tempi ciclo delle diverse stazioni di lavoro, non possono essere divulgate in quanto rappresentano dati sensibili aziendali.

Nell'esempio in Figura 3.10, il gantry rappresentato è quello che trasporta le entità in una delle due stazioni 20. Il carrello, in questo caso, ha due bracci e, quindi, due pinze, P1 e P2. Le movimentazioni avvengono secondo il seguente ciclogramma, che descrive in ordine l'operazione svolta, lo stato delle pinze P1 e P2 e la direzione di movimento.

Prelievo dell'entità dal buffer conveyor in ingresso (il carrello si trova in posizione iniziale in corrispondenza dell'ingresso):

1	Discesa braccio 1	P1 vuota	P2 vuota	asse z
2	Chiusura pinza P1	P1 piena	P2 vuota	-
3	Salita braccio 1	P1 piena	P2 vuota	asse z

Traslazione e prelievo dell'entità già lavorata dalla stazione prescelta per il deposito della nuova entità:

4	Traslazione carrello	P1 piena	P2 vuota	asse x
5	Discesa braccio 2	P1 piena	P2 vuota	asse z
6	Chiusura pinza P2	P1 piena	P2 piena	-
7	Salita braccio 2	P1 piena	P2 piena	asse z

Deposito dell'entità da lavorare nella stazione appena svuotata:

8	Traslazione carrello	P1 piena	P2 piena	asse x
9	Discesa braccio 1	P1 piena	P2 piena	asse z
10	Apertura pinza P1	P1 vuota	P2 piena	-
11	Salita braccio 1	P1 vuota	P2 piena	asse z

Deposito dell'entità lavorata e prelevata da P2, sul buffer conveyor in uscita, e ritorno del carrello in posizione iniziale:

12	Traslazione carrello	P1 vuota	P2 piena	asse x
13	Discesa braccio 2	P1 vuota	P2 piena	asse z
14	Apertura pinza P2	P1 vuota	P2 vuota	-
15	Salita braccio 2	P1 vuota	P2 vuota	asse z
16	Traslazione carrello	P1 vuota	P2 vuota	asse x

La stazione prescelta, per il deposito dell'entità, può essere, in questo caso, la 20.1 oppure la 20.2. Dunque il carrello traslerà della distanza necessaria a raggiungere una delle due stazioni. Le logiche della scelta verranno definite in seguito, durante la costruzione del modello di simulazione.

Il ciclogramma appena descritto è rappresentativo di una situazione ideale, in cui:

- almeno una delle due stazioni ha finito la lavorazione del pezzo precedente e può accoglierne uno nuovo;
- il buffer conveyor a valle ha spazio a sufficienza affinché possa essere scaricato il prodotto lavorato.

Tuttavia, durante il funzionamento dell'impianto è possibile che queste due condizioni non si verifichino. Qualora entrambe le stazioni stiano ancora processando un'entità, la nuova entità in attesa di essere lavorata, viene prelevata e rilasciata nel *drip tray buffer* del gantry. Lo stesso avviene per l'entità che ha finito di essere lavorata, qualora il buffer conveyor a valle sia saturo. Il *drip tray buffer* è diviso,

dunque, in due parti: il buffer Raw Material, che accoglie le entità non ancora processate, e il buffer Work Material, in cui sono depositate le entità già lavorate. Nel caso in cui anche il *drip tray buffer* del gantry sia pieno, si andrà a generare una coda che riempirà il buffer a monte del gantry stesso.

La maggior parte dei *gantries* presenti nel sistema, hanno un carrello con due pinze e movimentano le entità con la stessa logica sopra descritta. Ad esempio, il portale che gestisce le stazioni 50, nonostante debba depositare e prelevare su tre stazioni, comunque ha un carrello con due pinze, una per il prelievo e il deposito del pezzo grezzo e l'altra per il prelievo e deposito del pezzo lavorato.

Ci sono, poi, gantries che hanno un carrello con una sola pinza. Tali gantries sono utilizzati per movimentare le entità da un conveyor all'altro, senza stazioni intermedie in cui depositare o prelevare i pezzi. Infatti molti di essi sono posizionati negli incroci e si occupano di bilanciare i flussi, trasportando le entità di tipo B dal flusso 2 al flusso 1 e viceversa.

Le stazioni 60 e 70 che lavorano il tipo B sono gestite da un gantry più particolare, costituito da due carrelli C1 e C2, che hanno rispettivamente una e due pinze. La pinza $P1_{C1}$ ha il solo compito di prelevare le entità dal *conveyor* in ingresso e depositarle sulla stazione 60. La pinza $P1_{C2}$ preleva le entità di tipo B2 dalla stazione 60 e le deposita nella stazione 70. La pinza $P1_{C2}$, infine, preleva le entità di tipo B1 dalla stazione 60 e le entità di tipo B2 dalla stazione 70 e le deposita sul conveyor di uscita. Allo stesso modo è costituito e funziona il gantry che trasporta le entità di tipo A nella stazione 140.

Il portale che gestisce le stazioni 80 è, invece, costituito da un solo carrello con tre pinze. Le pinze Z1 e Z2 prelevano contemporaneamente un pezzo a testa dal conveyor di ingresso. Poi, il carrello si sposta sopra la prima stazione 80: qui la pinza Z3 preleva il pezzo lavorato e Z2 può depositare il pezzo grezzo. Il carrello si sposta, quindi, sulla seconda stazione 80, in cui Z2 (vuota) preleva il pezzo lavorato e Z1 deposita il pezzo grezzo. Infine, il carrello trasla verso il conveyor di uscita, dove Z2 e Z3 depositano contemporaneamente i due pezzi lavorati. Il ciclo si conclude con il carrello che torna in posizione iniziale sul conveyor di ingresso, con tutte e tre le pinze vuote.

L'ultimo caso particolare riguarda il portale che gestisce le tre stazioni 100. Esso è costituito, infatti, da un solo carrello con quattro pinze e, a livello concettuale, la logica di movimentazione è uguale a quella, appena descritta, del portale che gestisce le stazioni 80.

Come si nota dai ciclogrammi, la pianificazione dei movimenti del portale in tempo reale e il flusso di materiali, sono altamente correlati. Dunque la modellazione degli stessi è molto complessa. Inoltre, una stazione di lavoro con gantry è soggetta a disturbi causati non solo da eventi casuali come i guasti dei macchinari di lavorazione, ma anche dai potenziali ritardi dei movimenti del gantry, a causa di una scorretta politica di pianificazione: ciò può seriamente influire sulla produttività dell'intero sistema di produzione. Dunque, è necessario ottimizzare la sequenza dei diversi movimenti con delle logiche precise, al fine di ridurre il più possibile le attese dei pezzi all'ingresso della stazione di lavoro e alla fine della lavorazione nella stazione stessa.

3.4.3 Aspetti energetici del sistema

L'utilizzo sempre più ampio di robots industriali, come i *gantry robots*, necessario per soddisfare gli elevati requisiti di qualità, personalizzazione e flessibilità dei prodotti, ha aumentato notevolmente l'esigenza di miglioramento dell'efficienza energetica [53]. Ad esempio, infatti, nel settore Automotive, circa il 40% di tutta l'energia spesa in un processo produttivo, viene consumata dai robots [54].

Nel sistema in esame le operazioni di *pick and place* svolte dal robot gantry sono le seguenti.

1. Movimentazione del carrello per portare la pinza in posizione di prelievo
2. Operazione di prelievo svolta dalla pinza
3. Movimentazione del carrello per portare la pinza in posizione di deposito
4. Operazione di deposito svolta dalla pinza

Ogni singolo movimento è caratterizzato dal consumo di energia. Al fine di ridurre i consumi energetici di ogni operazione, è molto importante ottimizzare i movimenti del robot gantry, rendendoli più fluidi e, dunque, eliminando il più possibile *tempi morti*, accelerazioni e decelerazioni. Ad esempio, infatti, il gantry, anche quando non è in movimento, comunque è in funzione e consuma energia. Qui diventa fondamentale il concetto di integrazione, di cui si è parlato nel capitolo 2: i vari gantries devono essere sincronizzati tra di loro e con i tempi di lavoro di tutte le stazioni del processo produttivo per coordinare al meglio i loro movimenti e ridurre i tempi di inattività, mantenendo inalterata la produttività e la qualità.

In generale, attualmente, il consumo di energia influisce fortemente sul *payback period* (periodo di recupero dell'investimento) dei robot industriali, nonché sulla sostenibilità del processo di produzione [53]. Le fonti di consumo energetico del gantry sono le seguenti.

- Un servomotore necessario per azionare il carrello
- Dei servomotori che muovono verticalmente i bracci di carico.
- Dei piccoli motori (unità pneumatiche) che guidano l'apertura e la chiusura delle pinze.

I servosistemi permettono operazioni di posizionamento estremamente precise, caratterizzate da un controllo ad alta precisione su velocità ed accelerazione. Essi sono formati da quattro componenti principali: un motore, un driver, un controller ed un dispositivo di feedback (in genere un encoder).

Il controller calcola la quantità di spostamento necessaria ed invia un segnale elettrico al driver (amplificatore servo). Il driver, poi, converte tale segnale in una specifica quantità di corrente che invia al motore, azionandolo. Sul motore è posizionato, inoltre, un encoder, che rileva la velocità di rotazione dell'albero motore e la invia al driver. Il driver, infine, calcola l'errore del segnale e controlla la rotazione in modo che l'errore diventi nullo e l'albero si sposti della giusta quantità.

Tabella 3.4: Specifiche tecniche del gantry

		Asse x	Asse z
Carico massimo ammissibile	<i>kg</i>	60	60
Velocità nominale	<i>m/s</i>	2,33	1,83
Velocità effettiva	<i>m/s</i>	2,16	1,66
Accelerazione massima	<i>m/s²</i>	2,5	3
Rapporto di trasmissione	-	3:1	4:1
Velocità nominale del motore	<i>rpm</i>	4500	4500

Nella Tabella 3.4 sono elencate le principali caratteristiche tecniche di un gantry generico dell'impianto in esame. Tali specifiche, disponibili per ogni gantry del sistema, verranno utilizzate, nel Paragrafo 3.5.7, per la modellazione dei consumi energetici dei gantries stessi.

3.5 Creazione del Digital Twin

Dopo aver raccolto le informazioni necessarie sulla base degli obiettivi di simulazione, si può procedere all'implementazione del modello digitale, che consiste non solo nell'inserimento, sul *frame* di Plant Simulation, di ogni stazione di lavoro e di ogni elemento di movimentazione presente sul layout del sistema, ma anche nella definizione delle logiche che regolano il comportamento di ogni oggetto ed ogni entità. Tali logiche verranno espresse con la scrittura di metodi tramite linguaggio di programmazione SimTalk.

3.5.1 Modellazione delle stazioni di lavoro

Tutti gli oggetti possono essere selezionati dalla *Toolbox*, già menzionata nel Paragrafo 3.1.1 (Figura 3.3). Ogni macchinario in cui vengono lavorate le diverse entità è rappresentato dall'oggetto *SingleProc* ed è denominato con la sigla *OP* (Operating Station) seguita dal numero della stazione. Al fine di organizzare le informazioni relative ai tempi ciclo di ogni stazione, è stata creata una tabella, tramite l'oggetto *TableFile*, posizionato anch'esso all'interno del frame.

Ogni riga della tabella corrisponde ad una stazione di lavoro ed ogni colonna ad una tipologia di entità (A, B1, B2). In ogni casella è inserito un numero in formato *real*, che indica il tempo in minuti relativo ad una determinata stazione quando processa un ben preciso tipo di entità. Se una casella è nulla, allora vuol dire che la stazione della riga corrispondente non processa l'entità di quella colonna. Tale tabella è stata denominata *CycleTimes* (Figura 3.11). Per comprendere meglio questo concetto, nella Figura 3.11 sono rappresentate solo le prime due righe di questa tabella (con tempi ciclo fittizi).

Per ogni stazione di lavoro presente sul *frame*, è stato possibile inserire un controllo *On Entrance*, cioè un metodo che, ogni qual volta un'entità è in procinto di entrare nella stazione, definisca il tempo di processo da inserire nella stazione stessa (Figura 3.12). Tale metodo, denominato *SetCycleTime* scansiona l'intera tabella *CycleTimes*, cercando la stazione in cui esso si trova e selezionando il giusto valore del tempo di processo in base alla tipologia di entità in ingresso (colonna blu e riga verde della tabella *CycleTimes* in Figura 3.11). É possibile, infatti, accedere alle singole celle, utilizzando il loro indice, cioè il numero della riga e della colonna, oppure il loro nome. Adottando tale metodologia le stazioni diventano intelligenti, adattando da sole di volta in volta il proprio tempo di processo in base all'entità da processare. Inoltre, grazie alle tabelle, risulta molto più immediato visualizzare errori nei dati o, qualora lo richiedesse l'azienda, modificarli, poiché non è necessa-

rio aggiornare il valore all'interno di ogni *SingleProc*, ma è sufficiente sovrascrivere i nuovi valori in tabella.

The screenshot shows the configuration window for **OP10_1** with the following settings:

- Name: OP10_1
- Label:
- Failed: ☐
- Planned: ☒
- Entrance locked: ☐
- Exit locked: ☒
- Processing time: Const, 0:40.2
- Set-up time: Matrix(Type), TAB_SETUP_Time_1
- Recovery time: Const, 0
- Recovery time starts: When part enters
- Cycle time: Const, 0

Below the window are two tables:

CycleTimes

	string 0	real 1	real 2	real 3
string	STATION	A	B1	B2
1	OP10_1	0.00	0.67	0.67
2	OP10_2	0.78	0.76	0.76

TAB_SETUP_Time_1

		time 1	time 2	time 3
string		A	B1	B2
1	A	0.0000	30:00.0000	30:00.0000
2	B1	30:00.0000	0.0000	0.0000
3	B2	30:00.0000	0.0000	0.0000

Figura 3.11: Impostazione del tempo di processo e dei tempi di setup tramite Tabella *CycleTimes* e Tabella *Setup*

Oltre ad i tempi di processo è necessario definire anche i tempi di setup. Ciò è stato effettuato sempre tramite delle tabelle in cui ogni riga ed ogni colonna corrisponde ad un tipo di entità. Come è descritto nella Figura 3.11, ad esempio, se una stazione di lavoro passa dal lavorare un'entità di tipo B ad una di tipo A, allora si dovrà attendere un tempo di setup del macchinario di 30 minuti. I tempi di setup non sono uguali per ogni stazione, quindi è necessario creare una tabella per ogni stazione. Ovviamente se una stazione può processare soltanto un tipo di entità, allora

non sarà necessario definire nessun tempo di setup. Come si vede dalla Figura 3.11, la tabella di setup è poi inserita all'interno della stazione di lavoro, nell'apposito campo, per essere letta automaticamente ogni volta che sarà necessario.

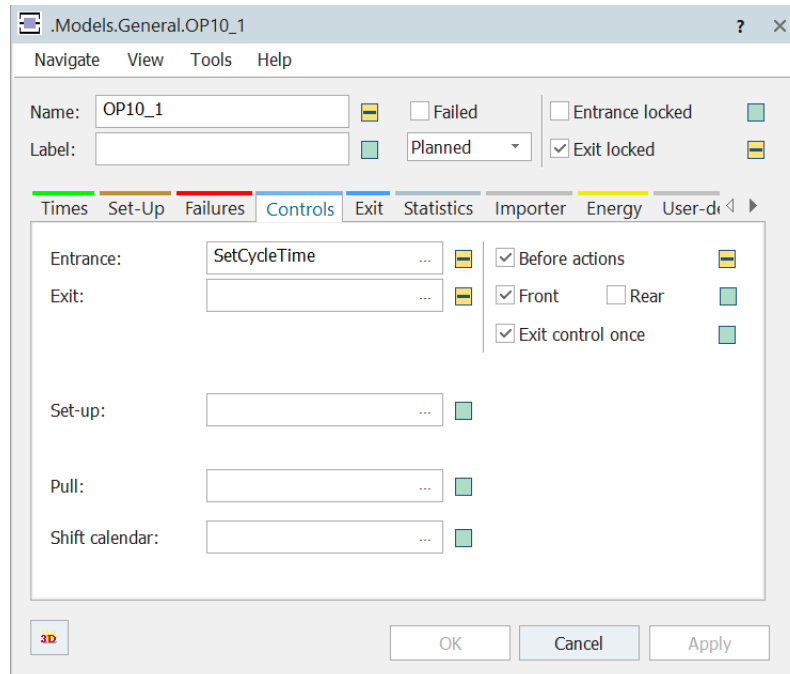


Figura 3.12: Inserimento di un metodo *OnEntrance* all'interno di una stazione di lavoro

3.5.2 Modellazione dei consumi energetici dei macchinari

Per ogni macchinario (*SingleProc*) è possibile definire un profilo energetico, attivando le impostazioni relative alle potenze energetiche di input dei diversi stati del macchinario (Figura 3.13).

- **Working.** Si riferisce alla potenza erogata dal macchinario mentre sta lavorando un'entità.
- **Setting-up.** È la potenza spesa dal macchinario durante i periodi di setup, in cui lo si prepara ad accogliere un nuovo tipo di entità.
- **Operational.** Si riferisce alla potenza erogata dal macchinario quando esso, nonostante sia operativo, è in attesa di un'entità da lavorare. Tutti i motori sono in funzione, ma la macchina non sta lavorando perché è vuota.
- **Failed.** È la potenza consumata quando il macchinario è soggetto ad un guasto.

- **Standby.** È la potenza erogata quando il macchinario è in pausa: l'elettronica è pronta, ma i motori principali sono spenti.
- **Off.** Si riferisce alla potenza consumata quando il macchinario è spento. È lo stato di minore consumo energetico.

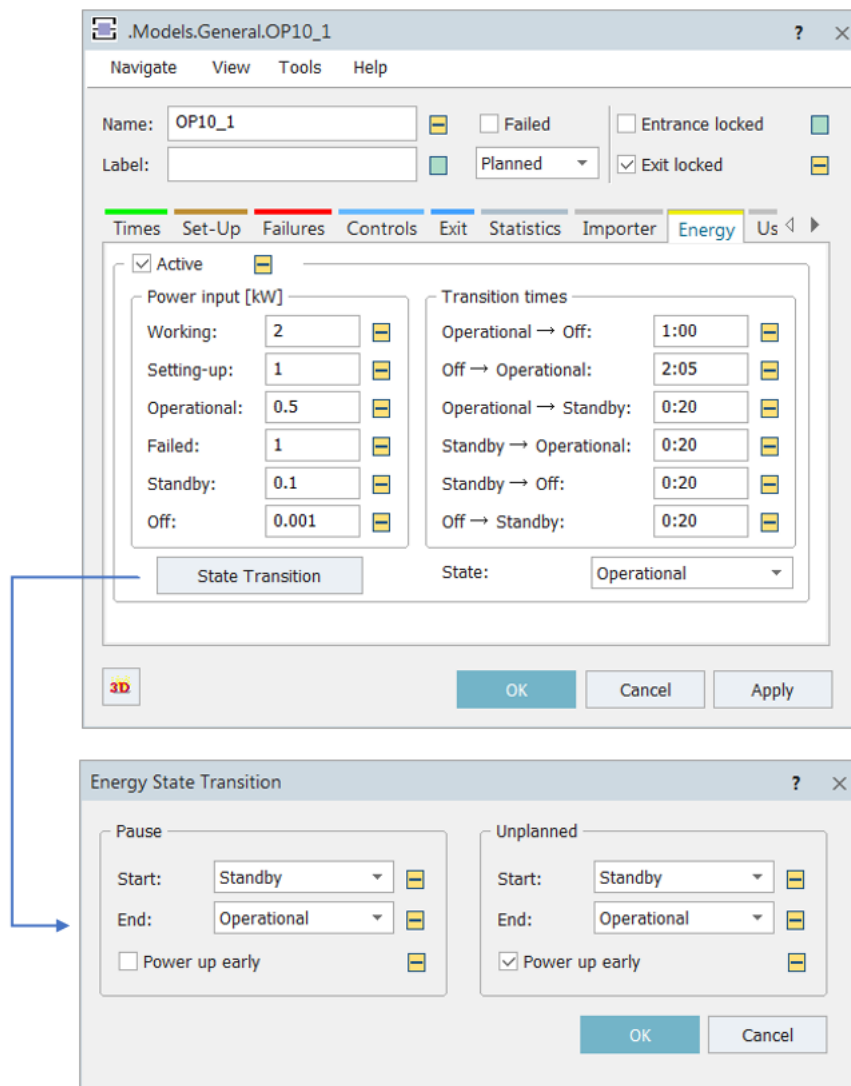


Figura 3.13: Impostazione dei parametri energetici in una stazione di lavoro

È possibile anche definire i tempi di passaggio da uno stato energetico all'altro. Tali intervalli di tempo sono definiti tra gli stati Off, Operational e Standby, poiché gli intervalli fra gli altri tre stati, Working, Setup e Failed, vengono identificati automaticamente, durante la simulazione del flusso di materiale.

Durante il tempo di pausa o di inattività non pianificata, i più moderni macchinari permettono agli utenti di spegnere facilmente il motore principale e andare

in uno stato di standby predefinito o in modalità off. Questa funzione, purtroppo, viene utilizzata raramente, in quanto molte aziende non conoscono il potenziale di risparmio che ne deriva. Nell'Energy State Transaction (Figura 3.13) si può stabilire in quale stato deve entrare la macchina durante questi tempi di non attività, scegliendo dal menù a tendina tra *No change*, *Standby* e *Off*.

È possibile anche stabilire in quale stato deve tornare la macchina una volta che è finito il tempo in cui è spenta o è in standby, scegliendo, dal manù a tendina corrispondente, se la macchina deve tornare allo stato precedente alla pausa (*Previous State*), allo stato operativo (*Operational*) o allo stato di Standby. Per il modello di simulazione in esame è stato stabilito che il macchinario vada in standby durante i periodi di pausa o inattività non pianificata e, alla fine di questo intervallo di tempo, torni allo stato operativo.

I consumi energetici impostati per le diverse stazioni di lavoro, come quelli in Figura 3.13 riferiti alle stazioni numero 10, sono stati stimati a partire da dati storici, forniti dalla Sim.Tec. e relativi ai diversi macchinari divisi in base al tipo di lavorazione eseguita.

3.5.3 Modellazione dei conveyors

I conveyors sono rappresentati tramite un altro oggetto della *Toolbox* (Figura 3.3) chiamato *Line*. Tale oggetto, rappresentato in Figura 3.14, svolge la funzione di trasportare il flusso di entità del sistema lungo tutta la sua lunghezza, con una velocità costante. Un'entità non può sorpassare un'altra mentre si muove sulla Line. Inoltre, a meno che non si inserisca un controllo all'uscita della Line stessa, essa distribuisce le entità in modo uguale tra i successori a cui è connessa. È anche possibile inserire una determinata distanza tra le entità che la percorrono.

Nel modello di simulazione oggetto di studio, è stata fornita dall'azienda la velocità di ogni conveyor ed il numero massimo di pezzi che ognuno di essi può trasportare. Dunque, inserendo una capacità ben definita per ogni sistema di trasporto, non è stato necessario definire un gap tra le diverse entità che li percorrono. Dopo aver definito la velocità e la lunghezza di ogni conveyor, il tempo di attraversamento di un'entità viene calcolato automaticamente. Come si nota nella Figura 3.14, riferita ad una *Line* del sistema, è stata selezionata la casella *Accumulating*: in questo modo, quando l'uscita dell'oggetto è bloccata, le entità si possono accumulare sul conveyor. Di solito, infatti, la *line* non permette l'accumulo e, quando un'entità si ferma perchè la stazione successiva è bloccata, tutte le entità sulla *line* vengono fermate e la velocità corrente della *line* viene portata a zero.

Per quanto riguarda i consumi energetici dei *conveyors*, essi sono impostati allo stesso modo di quelli delle stazioni di lavoro.

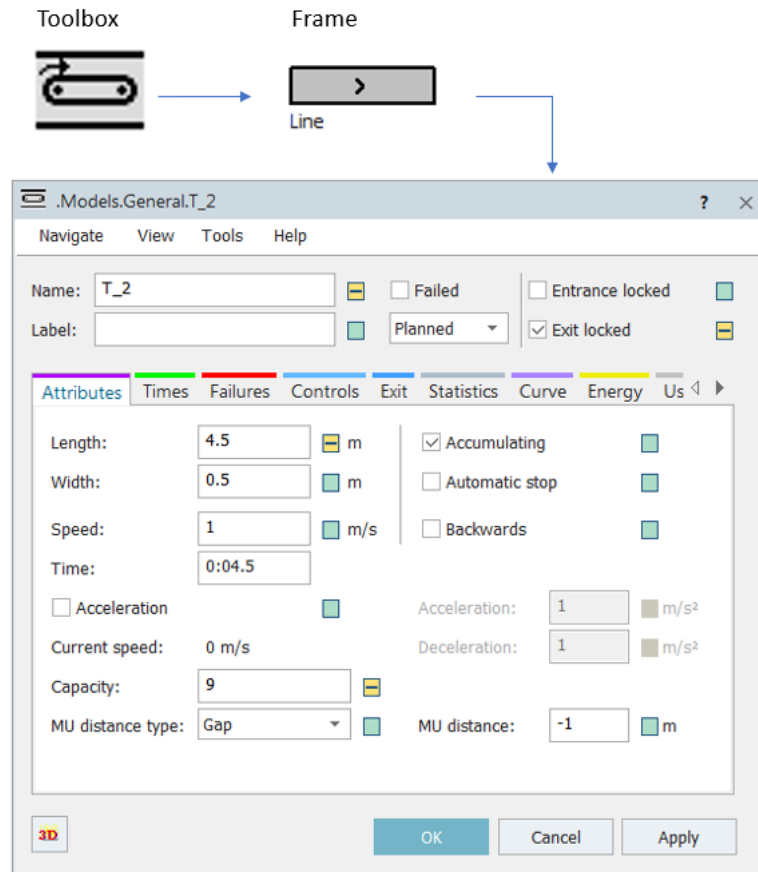


Figura 3.14: Oggetto *Line* con relativa Dialog Box

3.5.4 Modellazione dei *gantries*

Per quanto riguarda il gantry, non esiste in Plant Simulation un oggetto che lo possa rappresentare, dunque è stato necessario creare un oggetto di libreria specifico che abbia tutte le caratteristiche per svolgere le sue stesse funzioni (Figura 3.15). Il nuovo oggetto di libreria è stato creato a partire da altri due oggetti, la cui classe è già presente in libreria: la *Track* e il *Transporter*.

La *Track* è un percorso a senso unico non provvisto di movimentazione propria. Infatti, al contrario della *Line* provvista di movimentazione propria, è necessario che la *Track* sia percorsa da un mezzo capace di muoversi su di essa. Tale mezzo di trasporto, in questo caso, è costituito dall'oggetto *Transporter* e, affinché esso sia associato ad una *Track*, è necessario trascinarlo su di essa con il mouse. In entrambi

sono stati inseriti, oltre agli attributi predefiniti, altri attributi, costituiti da variabili e metodi che impongono determinati comportamenti ai due oggetti.

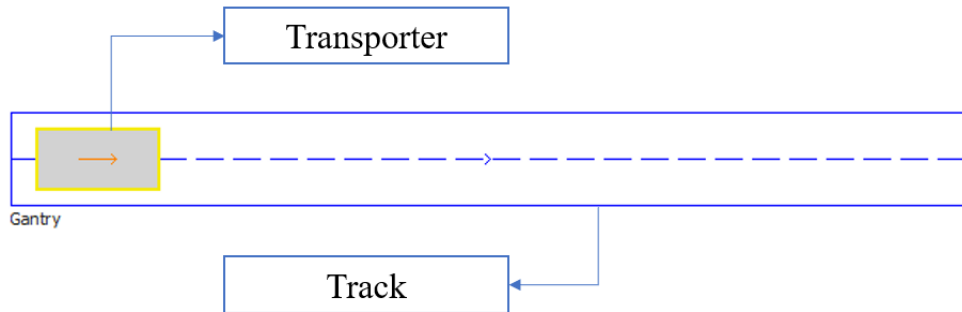


Figura 3.15: Rappresentazione dell'oggetto *Gantry* su Plant Simulation

La *Track* rappresenta la struttura su cui scorre il carrello (asse x) e il *Transporter* rappresenta il carrello stesso. Il *Transporter* si muove sulla *Track* ed esegue di volta in volta delle missioni. Tali missioni sono stabilite da diversi metodi in base al verificarsi degli eventi durante il run di simulazione.

I bracci di carico e le pinze non sono stati modellizzati graficamente, poiché ai fini degli obiettivi di simulazione non è interessante vedere il loro movimento a livello grafico, ma è necessario semplicemente tenere conto del tempo che intercorre tra il posizionamento del carrello sulla zona di carico/scarico e il prelievo/deposito dell'albero motore. Dunque, il *transporter* che scorre sulla *track*, una volta raggiunta la destinazione, assegnatagli precedentemente da un metodo, aspetta il tempo necessario al carico/scarico dell'entità e ritorna in posizione iniziale, aspettando che gli venga assegnata un'altra missione.

Nella Figura 3.16, che rappresenta la finestra di dialogo della *track Gantry*, si può notare la lista degli attributi *user-defined* utilizzati per la costruzione del nuovo oggetto: quattro tabelle, un metodo ed un attributo booleano.

La tabella CARRIAGE ha lo scopo di descrivere il carrello o più carrelli che caratterizzano un determinato gantry. Essa, infatti, assegna un valore ai diversi attributi che caratterizzano il carrello. Se sul gantry è presente un solo carrello ci sarà una sola riga, se ne sono presenti due allora saranno due anche le righe. Per ogni carrello gli attributi, corrispondenti alle colonne della tabella, sono il numero di pinze, la lunghezza del carrello, la velocità verticale del braccio di carico, la velocità orizzontale del carrello, l'accelerazione (uguale per carrello e bracci di carico), i tempi di discesa e di salita del braccio con pinza vuota e piena e il tempo di apertura/chiusura della pinza. Inoltre sono presenti altri due attributi, che non hanno un

valore numerico ma booleano: essi sono *doppio prelievo* e *doppio rilascio* e possono essere contraddistinti da *true* o *false*. Questi ultimi attributi sono utilizzati per gestire quei gantries con un carrello composto da tre o quattro pinze, che possono, quindi, prelevare o rilasciare due pezzi contemporaneamente.

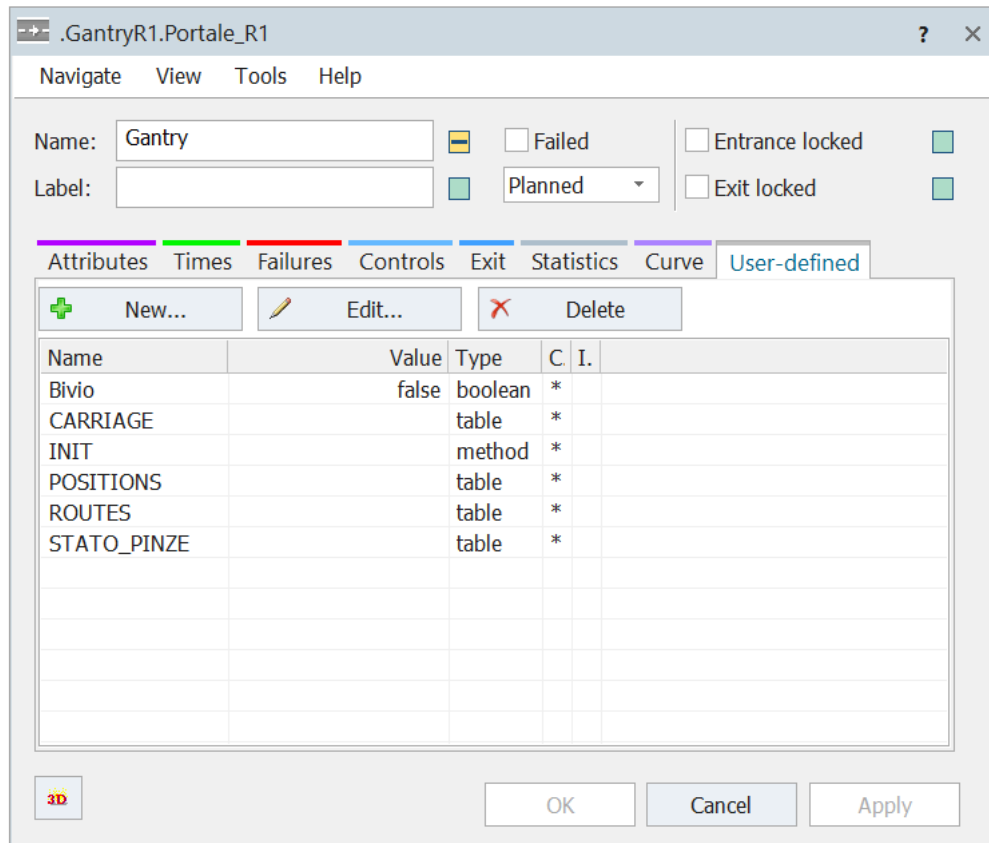


Figura 3.16: Dialog box user-defined dell'oggetto Gantry

La tabella ROUTES, invece, descrive le destinazioni e il ruolo di ogni pinza corrispondente ad un braccio di carico. Ogni riga individua una pinza ed ogni colonna una possibile destinazione. Le caselle possono essere riempite in tre diversi modi:

- Prl Se una pinza prevede il solo prelievo in una destinazione
- Rl Se una pinza prevede il solo deposito in una destinazione
- Prl+Rl Se una pinza prevede sia il prelievo che il deposito in una stessa destinazione

Ogni possibile destinazione deve corrispondere ad un oggetto presente sul frame, altrimenti la tabella non può essere letta correttamente dal codice. Nell'esempio in Figura 3.17 è rappresentata la tabella ROUTES per il gantry che movimentava le

entità in una delle due stazioni numero 20. La pinza 1 può prelevare le entità dal punto di ingresso IN_OP e rilasciarle in OP20_1 e OP20_2, mentre la pinza 2 può prelevare le entità in una delle due stazioni e rilasciarle nel *conveyor* finale, che in questo caso prende il nome di T_7.

	string 0	string 1	string 2	string 3	string 4
object		IN_OP...	OP20_1	OP20_2	T_7
1	Pinza_1	Prl	Rl	Rl	-
2	Pinza_2	-	Prl	Prl	Rl

Figura 3.17: Esempio di tabella ROUTES dell'oggetto Gantry

Il metodo *Init* è un metodo particolare di Plant Simulation, che viene eseguito nell'istante in cui inizia l'esecuzione della simulazione. Tale metodo viene utilizzato per inizializzare i valori di alcuni parametri che caratterizzano il gantry. Esso, infatti, ha la funzione di compilare le diverse tabelle presenti all'interno dell'oggetto *Gantry* all'inizio della simulazione di flusso. La tabella ROUTES è l'unica che richiede di essere compilata manualmente, poichè presenta caratteristiche diverse per ogni gantry senza l'esistenza di una regola comune.

In primo luogo, l'Init compila la tabella CARRIAGE, trasferendo le informazioni da una tabella generale chiamata *SetGantry* alle singole tabelle CARRIAGE di ogni oggetto *Gantry*.

La tabella *SetGantry* è utilizzata, infatti, come input e raccoglie i dati di tutti i gantries del sistema. Per ogni riga, relativa ad un carrello del sistema, corrispondono diverse colonne, associate ognuna ad un attributo diverso con un proprio formato. Tali attributi sono gli stessi visti per la tabella CARRIAGE. Dunque, il metodo Init, per ogni gantry, cerca la riga corrispondente e la copia all'interno della tabella CARRIAGE.

In secondo luogo, l'Init compila le tabelle rappresentate in Figura 3.18 e 3.19.

Nella prima tabella (Figura 3.18) si registrano, nella colonna zero, tutte le possibili destinazioni del carrello del gantry e, nella colonna 1, le loro posizioni, cioè le distanze per ogni destinazione a partire dall'inizio della *Track* che costituisce la struttura del gantry. In questo modo, durante la simulazione, per ogni missione compiuta dal carrello, è possibile calcolare esattamente la distanza percorsa. Tali distanze corrispondono alle distanze effettive del sistema reale.

Ciò è possibile grazie al layout in scala del sistema in esame, che è stato inserito come sfondo del frame principale. Dopo l'inserimento del layout è stato impostato lo *Scaling Factor*, cioè un fattore che converte le coordinate dei pixel del software

in coordinate di lunghezza. Di default è impostato uno *Scaling Factor* di 0.05, il che vuol dire che un pixel corrisponde a 0.05 metri. Quando si modifica il fattore di scala, Plant Simulation modifica la dimensione dei pixel, cioè la lunghezza in metri a cui corrisponde un pixel. In questo modo, si può far corrispondere la distanza in pixel tra due oggetti posizionati nel frame, alla distanza reale in metri presente nell'impianto.

Nella seconda tabella (Figura 3.19) ad ogni riga corrisponde una pinza del gantry e, per ognuna di esse, con l'esecuzione dell'Init vengono registrati, nella colonna CARRO, i rispettivi carrelli di appartenenza. In seguito, all'avanzare del tempo di simulazione, nella colonna MU vengono registrate le *Mobile Units*, cioè le entità che di volta in volta sono trasportate dal gantry. Le tabelle, infatti, possono contenere variabili statiche, che non cambiano, o dinamiche, che sono aggiornate durante la simulazione. La colonna MU è proprio un esempio di queste ultime.

	object 0	real 1
string		distanza calcolata dall'inizio della track
1	*.Models.General.IN_OP20_12	0.95
2	*.Models.General.OP20_1	5.84
3	*.Models.General.OP20_2	12.28
4	*.Models.General.T_7	16.45
5	*.Models.General.R_GSE_P2	4.23
6	*.Models.General.W_GSE_P2	10.23

Figura 3.18: Esempio di tabella POSITIONS dell'oggetto Gantry

	string 0	object 1	object 2
string		CARRO	MU
1	Pinza_1	*.GantryR1.Carriage_R1:20	*.MUs.PRODOTTO:73
2	Pinza_2	*.GantryR1.Carriage_R1:20	*.MUs.PRODOTTO:69

Figura 3.19: Esempio di tabella STATO_PINZE dell'oggetto Gantry

L'ultimo attributo booleano, *Bivio*, riguarda la possibilità di un gantry di trovarsi in un incrocio, cioè in un punto dell'impianto in cui è necessario prendere delle decisioni specifiche sul flusso in cui smistare i diversi tipi di prodotto. La gestione delle logiche dell'impianto sarà descritta in seguito.

Dopo aver descritto gli attributi definiti per la *Track*, struttura del gantry, è necessario descrivere quelli relativi al *Transporter* (Figura 3.20).

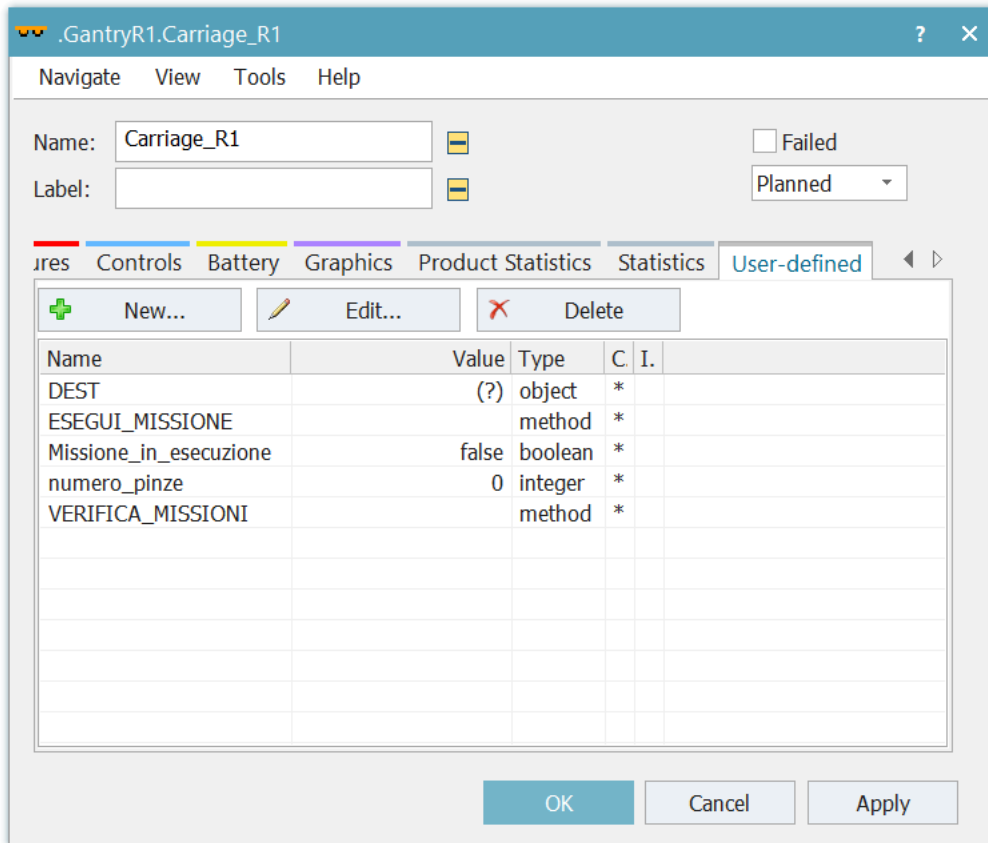


Figura 3.20: Dialog box user-defined dell'oggetto Carriage

Il carrello del gantry, prima di muoversi, verifica quale missione di movimentazione eseguire tramite il metodo VERIFICA_MISSIONE. La logica di scelta è descritta dal diagramma di flusso rappresentato in Figura 3.21. È importante sottolineare che dopo ogni iterazione del metodo, qualora non sia stata trovata nessuna missione da eseguire, prima di ricominciare la lettura, si attende un tempo di Time-Out di 5 secondi, affinché si verifichino dei cambiamenti, anche minimi, nello stato del sistema.

Dopo aver scelto la missione, si procede con il metodo ESEGUI_MISSIONE, con cui il carrello esegue le movimentazioni necessarie per portare a termine la missione.

Nella missione 1 il carrello raggiunge il conveyor in ingresso per prelevare l'entità da lavorare, la deposita nel buffer Raw Material del gantry e preleva, sempre da lì, un'altra entità che ha la stessa destinazione di quella appena depositata. In seguito, si porta fino alla stazione di destinazione: se la stazione è vuota, il carrello deposita semplicemente l'entità, altrimenti, preleva l'entità che ha finito la lavorazione e deposita quella da lavorare. In quest'ultimo caso, prima di ritornare nella posizione di partenza, il carrello deve andare a depositare sul conveyor o, in caso sia saturo, nel buffer Work Material l'entità lavorata.

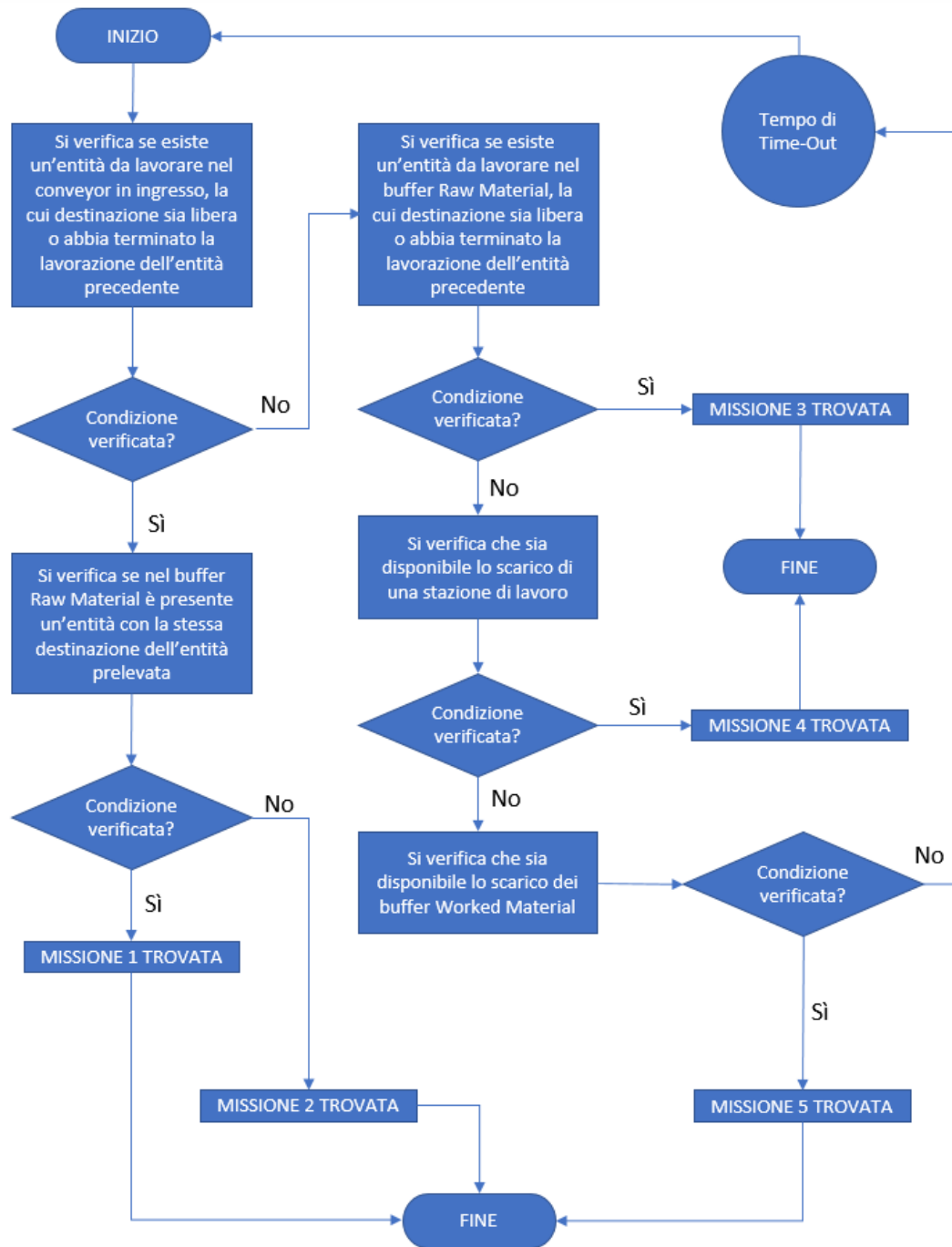


Figura 3.21: Diagramma di flusso della logica di scelta della missione del gantry

Nella missione 2 il carrello raggiunge prima il conveyor di ingresso, per prelevare l'entità da lavorare, e poi la stazione di destinazione per depositare la stessa entità. Il resto della missione è analogo alla missione 1.

Nella missione 3 il carrello raggiunge il buffer Raw Material e, da lì, preleva l'entità da lavorare. Poi si sposta sopra la stazione di destinazione per depositarla e prosegue in modo analogo alle missioni 1 e 2.

Nella missione 4 il carrello raggiunge una stazione di lavoro in cui un'entità ha finito la lavorazione, preleva l'entità stessa e la deposita sul conveyor di uscita o, in caso di saturazione, nel buffer Work Material del gantry.

Nella missione 5 il carrello raggiunge il buffer Work Material per prelevare un'entità e depositarla sul conveyor in uscita.

I buffer menzionati sono i *drip tray buffer*, di cui si è già parlato nella descrizione fisica del gantry all'interno del Paragrafo 3.4.2. Per modellarli si è utilizzato l'oggetto *Buffer* di Plant Simulation, che può essere dimensionato inserendo il valore della capacità, cioè il numero massimo di pezzi che può ospitare.

Come si vede in Figura 3.20, ad ogni oggetto *Carrello* viene assegnato un attributo di tipo *object* chiamato DEST. Esso varia durante la simulazione e, dunque, durante l'esecuzione delle missioni, registrando al suo interno, di volta in volta, l'oggetto di destinazione del carrello.

Un altro attributo variabile è il booleano *Missione_in_esecuzione*, che può essere uguale a *true* o *false*, a seconda se il carrello ha scelto la missione da eseguire oppure se sta proseguendo l'iterazione del metodo di verifica delle missioni perchè ancora non si sono verificate le condizioni per sceglierne una. Fin quando l'attributo è uguale a *true*, il carrello non può iniziare la ricerca di nuove missioni da eseguire.

3.5.5 Gestione dei bivi

Le gestione dei bivi è subordinata alle percentuali di prodotti in input ai due flussi ($FLOW_1$ e $FLOW_2$). Ad esempio, nel primo scenario, in cui si invia il 100% del prodotto B2 nel flusso 1 ed il 100% del prodotto A nel flusso 2, il bivio gestisce la direzione vincolandola rispetto alle percentuali di input presenti, e cioè inviando sempre il prodotto B2 nel flusso 1 ed il prodotto A nel flusso 2.

Se si prevede uno smistamento di un tipo di prodotto su più di un flusso, come avviene per il terzo scenario, in cui il prodotto di tipo B2 viene smistato tra il flusso 1 e il flusso 2, il bivio gestisce l'invio di tale variante, verso la destinazione successiva, equilibrando gli invii secondo la percentuale impostata, sulla base del numero di parti precedentemente inviate alle due destinazioni.

Quando un'entità si trova ad un bivio e la destinazione scelta non è accessibile, ad esempio perchè troppo satura, se il flusso prevede la possibilità di scegliere la seconda destinazione, come avviene per i prodotti non vincolati al 100% su di un solo flusso, il pezzo viene inviato all'altra destinazione, se questa è accessibile, altrimenti si resta in attesa di poter accedere alla prima destinazione scelta.

3.5.6 Scelta della stazione di destinazione

Per descrivere le logiche di movimentazione del gantry nel diagramma di flusso, si è spesso parlato di destinazione dell'entità. Infatti, all'interno di ogni entità, come è stato visto per il carrello, è stato inserito un attributo di tipo *object* chiamato *dest*, dentro al quale viene registrato l'oggetto di destinazione dell'entità, che cambia di volta in volta durante l'attraversamento del sistema da parte dell'entità stessa. Tale destinazione può essere costituita da una stazione di lavoro o da un conveyor.

Quando il gantry riceve in ingresso un prodotto da lavorare, esso ha già una destinazione, che viene impostata ricercando, tra le stazioni servite dal gantry di riferimento, una stazione che possa accettare il tipo di entità in ingresso, secondo la seguente logica.

1. In primo luogo, la stazione di destinazione viene ricercata tra le stazioni in attesa di un pezzo da lavorare. Se tutte sono in attesa, allora viene scelta la stazione fisicamente più distante dal conveyor di ingresso e più vicina al conveyor di uscita.
2. Se non si trova una stazione con tali caratteristiche, si prosegue la ricerca tra le stazioni che hanno terminato la lavorazione e sono in attesa che venga scaricato il prodotto lavorato.
3. Se non si trova una stazione con tali caratteristiche, si prosegue la ricerca scegliendo la stazione che ha meno pezzi in attesa nel buffer Raw Material del gantry di riferimento (se il buffer è presente).
4. Se non si trova una stazione con tali caratteristiche, ovvero se il portale non possiede buffer per il materiale non lavorato, viene scelta la stazione che prevede di terminare prima la lavorazione in corso.

Una volta terminata la lavorazione nella stazione scelta, l'entità assumerà come destinazione quella del conveyor di uscita.

3.5.7 Modellazione dei consumi energetici dei gantries

Come per le stazioni di lavoro ed i conveyors, anche per il gantry è possibile definire un profilo energetico. Tuttavia, per il gantry non si conoscono le potenze erogate, nè si hanno a disposizione dati storici per stimarne i consumi. Inoltre i due oggetti di partenza utilizzati per la modellazione del gantry, e cioè la *Track* ed il *Transporter*, sono di diversa natura rispetto alla *SingleProc* e alla *Line* e non c'è la possibilità di inserire al loro interno dei consumi energetici. La *Track* infatti

è un oggetto statico, non dotato di movimentazione propria, paragonabile ad una strada che può essere percorsa da un mezzo di trasporto. Allo stesso modo anche il *Transporter* non dispone delle impostazioni per inserire una potenza elettrica, perchè è pensato come un oggetto che si muove autonomamente trasportando entità, senza la necessità di essere collegato alla rete elettrica. Dunque, in Plant Simulation, esso è dotato soltanto di una batteria, che funge da sorgente di potenza: nella *dialog box* dell'oggetto, sotto la voce *Battery*, è possibile inserirne i valori della capacità, dello stato di carica e del consumo. In ogni caso, anche questo strumento non è stato utilizzato per il calcolo dell'energia consumata, poiché la potenza erogata dal motore del carrello non è costante, ma varia in base a diversi parametri, come il peso complessivo trasportato e la velocità.

L'energia utilizzata per ogni singola movimentazione del carrello lungo l'asse x, può essere calcolata come il lavoro compiuto dal motore elettrico per trasportare il carrello da un punto x_1 ad un punto x_2 . Il lavoro è pari al prodotto scalare tra il vettore forza ed il vettore spostamento. In primo luogo, quindi, è necessario calcolare la risultante delle forze che agiscono sul carrello. La forza complessiva, però, varia durante lo spostamento del carrello: esso, infatti, parte da fermo e deve raggiungere una velocità costante v , per poi rallentare e fermarsi. Dunque il calcolo del lavoro può essere diviso in tre fasi.

Prima fase. Il carrello è fermo e deve essere messo in movimento attraverso una forza che superi la forza di attrito statico. Immediatamente dopo lo stacco, inizia ad agire la forza di attrito dinamico, diretta in verso opposto rispetto al verso del moto e rappresentata in Figura 3.22 tramite la componente F_a . In direzione verticale agisce la forza peso P a cui si contappone la reazione vincolare N , uguale e contraria a P . Si supponga che il carrello subisca un'accelerazione a che lo metta in moto verso destra, fin quando non raggiunge la velocità v . A tale accelerazione, positiva verso destra, si contrappone la forza di inerzia $m \cdot a$, che agisce sempre in direzione x, ma con verso opposto all'accelerazione.

Si ottengono così le seguenti equazioni di equilibrio (3.1), in cui F è l'incognita, cioè la forza che è necessario applicare affinché il carrello si muova con le condizioni desiderate.

$$\begin{cases} N = P = m \cdot g \\ F = F_a + m \cdot a \end{cases} \quad (3.1)$$

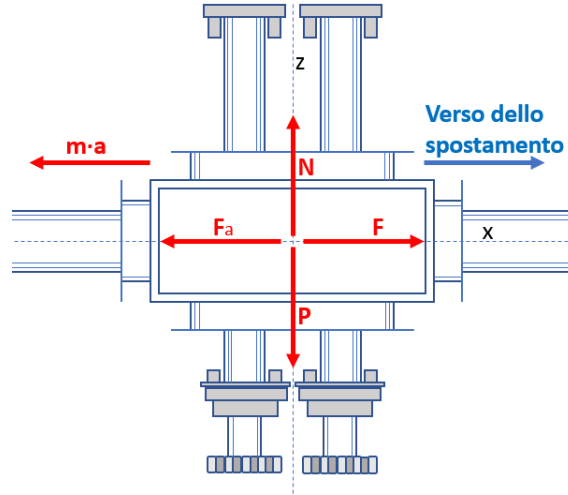


Figura 3.22: Diagramma di corpo libero in fase 1

In tale sistema la forza di attrito F_a è pari al prodotto tra il coefficiente di attrito dinamico μ e la reazione vincolare N , che agisce in direzione perpendicolare alla superficie. Dunque, in definitiva, la forza F che deve essere esercitata sul carrello è data dall'equazione 3.2.

$$F = \mu \cdot m \cdot g + m \cdot a \quad (3.2)$$

Dopo aver determinato la forza F che compie il lavoro, è necessario determinare lo spostamento del carrello di questa prima fase, cioè lo scorrimento effettuato fin quando non si raggiunge la velocità v desiderata.

Per calcolare lo spostamento si utilizzano le formule del moto rettilineo uniformemente accelerato (3.3 e 3.4).

$$v(t) = v_0 + a \cdot (t - t_0) \quad (3.3)$$

$$x(t) = x_0 + v_0(t - t_0) + \frac{1}{2} \cdot a \cdot (t - t_0)^2 \quad (3.4)$$

Considerando che $x_0 = 0$, $t_0 = 0$ e $v_0 = 0$ si possono calcolare t_1 ed x_1 , che rappresentano rispettivamente, il tempo necessario per raggiungere la velocità v e lo spazio effettivamente percorso x_1 .

$$t_1 = \frac{v}{a} \quad (3.5)$$

$$x_1 = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2 \quad (3.6)$$

Avendo come dati di input la velocità e l'accelerazione, forniti dall'azienda oggetto di studio, è facilmente calcolabile lo spostamento x_1 che, moltiplicato per la forza

F_1 , permette di ottenere il lavoro L_1 di questa prima fase (3.7). Si sottolinea che, essendo la forza applicata parallela allo spostamento del carrello, il prodotto scalare tra i due vettori diventa un normale prodotto tra i loro moduli.

$$L_1 = F_1 \cdot x_1 \quad (3.7)$$

Seconda fase. Il carrello ha raggiunto la velocità v e, da questo momento, inizia a muoversi di moto rettilineo uniforme. Affinché si mantenga una velocità costante, la forza F_2 da applicare al carrello deve essere tale per cui la risultante delle forze che agiscono su di esso sia nulla. Non è presente alcuna accelerazione e, dunque, la forza di inerzia è pari a zero.

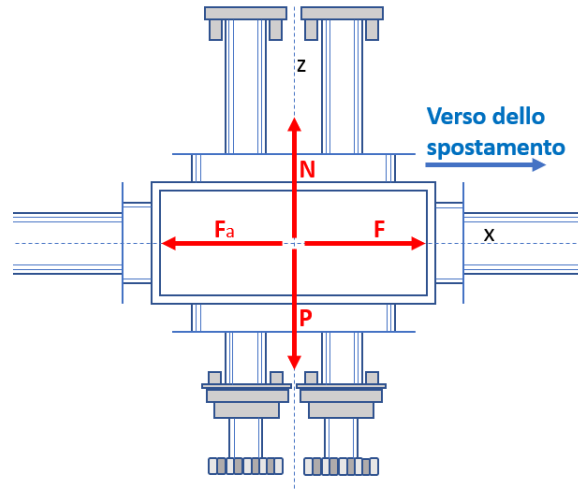


Figura 3.23: Diagramma di corpo libero in fase 2

Le equazioni di equilibrio in questo caso sono le seguenti.

$$\begin{cases} N = P = m \cdot g \\ F = F_a \end{cases} \quad (3.8)$$

Dunque, in definitiva, la forza F che deve essere esercitata sul carrello è data dall'equazione 3.9.

$$F = \mu \cdot m \cdot g \quad (3.9)$$

Anche qui, come per la fase 1, è necessario determinare lo spazio che il carrello percorre mantenendo una velocità costante. Tale spazio è uguale alla differenza tra lo spazio totale percorso dal carrello e gli spazi percorsi di moto uniformemente accelerato e decelerato. Per simmetria lo spazio x_1 , precedentemente calcolato, è

uguale allo spazio x_3 che il carrello percorrerà durante la fase 3 di decelerazione, poiché i valori assoluti di accelerazione e decelerazione, forniti dall'azienda, sono uguali. Lo spazio totale percorso è facilmente ricavabile dal modello di simulazione, che registra, come si è già visto, le posizioni di tutte le destinazioni raggiungibili da un carrello. Dunque x_2 è facilmente ottenibile.

Si può, quindi, ottenere il lavoro L_2 dalla seguente equazione.

$$L_2 = F_2 \cdot x_2 \quad (3.10)$$

Terza fase. Dopo aver percorso lo spazio x_2 a velocità costante, il carrello inizia la fase di decelerazione. Ciò che cambia, rispetto alla prima fase, è l'accelerazione, che in questo caso è negativa e, dunque, rivolta verso sinistra, con verso opposto allo spostamento del carrello. Per contro, la forza di inerzia $m \cdot a$ sarà rivolta verso destra, concorde allo spostamento.

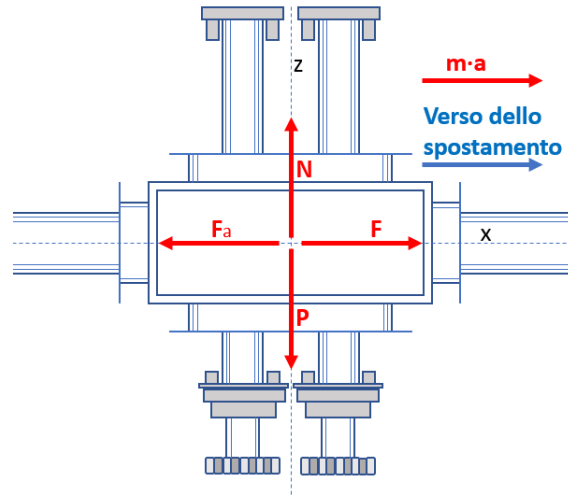


Figura 3.24: Diagramma di corpo libero in fase 3

Le equazioni di equilibrio in questo caso sono le seguenti.

$$\begin{cases} N = P = m \cdot g \\ F = F_a - m \cdot a \end{cases} \quad (3.11)$$

Dunque, in definitiva, la forza F che deve essere esercitata sul carrello è data dall'equazione 3.12.

$$F = \mu \cdot m \cdot g - m \cdot a \quad (3.12)$$

Per simmetria rispetto alla prima fase, lo spostamento x_3 è uguale ad x_1 . Si ottiene, quindi, il lavoro L_3 dalla seguente equazione.

$$L_3 = F_3 \cdot x_3 \quad (3.13)$$

Il lavoro complessivo che deve svolgere il motore elettrico è dato dalla somma delle equazioni 3.7, 3.10 e 3.13.

$$L_{TOT} = L_1 + L_2 + L_3 \quad (3.14)$$

I lavori svolti nelle tre fasi sono tutti lavori motore, cioè la forza e lo spostamento hanno lo stesso verso. Infatti, in base al valore dell'accelerazione (3 m/s^2) e del coefficiente di attrito (0.46), si ottiene $\mu \cdot g > a$. Il lavoro totale L_{TOT} è assimilabile all'energia utile necessaria per movimentare il carrello lungo l'asse x.

La massa m varia di volta in volta in base al carico effettivamente trasportato dal carrello. Se esso è vuoto si deve considerare soltanto la massa del carrello e quella dei relativi bracci di carico, mentre, se esso sta trasportando entità, è necessario aggiungere la massa di ogni entità trasportata. Gli alberi motore, che costituiscono le entità del sistema, sono di tre tipi diversi, ma, per semplificare il calcolo, è stato considerato un peso medio di 12 N per ogni albero motore e, dunque, una massa di 1.22 kg per entità.

Per calcolare l'energia spesa dai bracci di carico quando si muovono lungo l'asse verticale z, il metodo utilizzato è analogo a quello appena descritto. Nelle Figure 3.25 e 3.26 sono riassunti i diagrammi di corpo libero rispettivamente per i casi di salita e discesa del braccio di carico. In tali diagrammi sono trascurate le eventuali forze di attrito che agiscono tra il braccio e la struttura del carrello. Inoltre, come si evince dalle immagini, la forza necessaria affinché il braccio si muova in direzione verticale è sempre rivolta verso l'alto: questo perché, anche quando il braccio scende, il motore deve contrastare la forza peso che spingerebbe il braccio molto più rapidamente verso il basso ($g > a$). Infine si nota che la forza risultante relativa alla prima fase della salita è uguale a quella relativa alla terza fase della discesa, come anche la forza risultante relativa alla prima fase della discesa è uguale a quella relativa alla terza fase della salita. Il diagramma di stato della seconda fase è, invece, equivalente nei due casi. Partendo da queste considerazioni e dal fatto che, per simmetria, lo spazio percorso durante la fase di accelerazione è uguale a quello percorso durante la decelerazione, si può scrivere un'unica equazione di calcolo del lavoro, valida sia per la salita che per la discesa del braccio di carico.

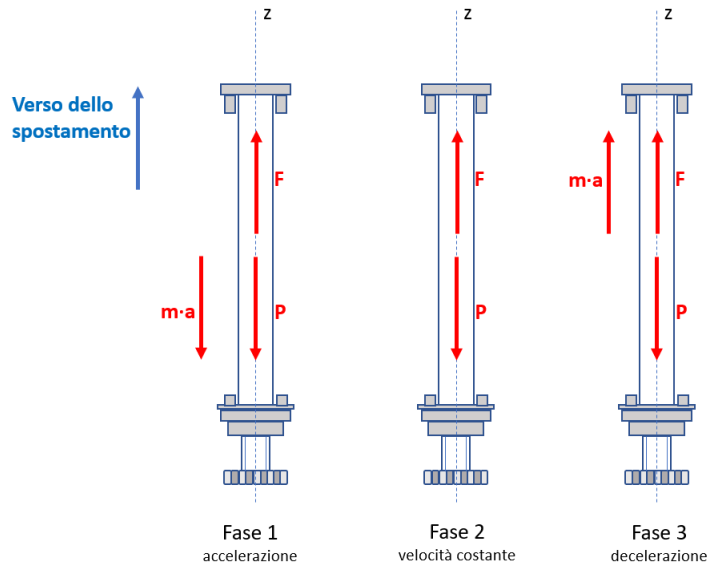


Figura 3.25: Diagrammi di corpo libero del braccio in salita

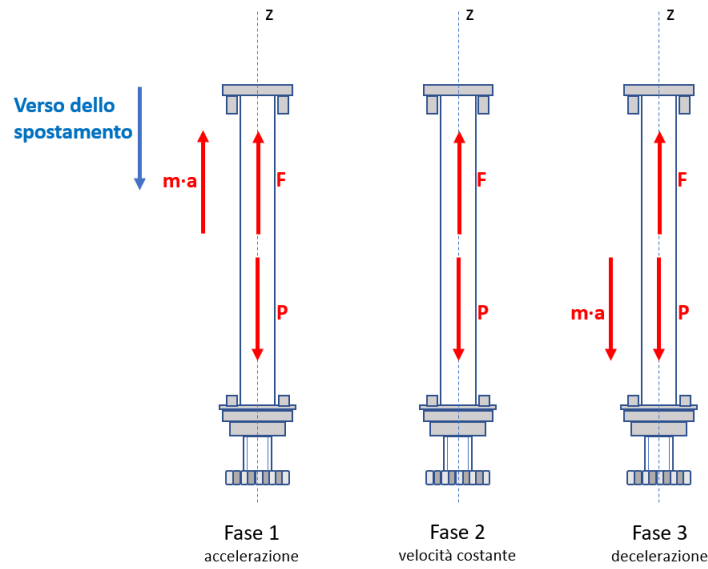


Figura 3.26: Diagrammi di corpo libero del braccio in discesa

Detti x_1 e x_3 gli spazi percorsi in fase di accelerazione e decelerazione ed x_2 lo spazio percorso a velocità costante, il lavoro utile compiuto dal motore è pari a:

$$L_{TOT} = m \cdot (g + a) \cdot x_1 + m \cdot g \cdot x_3 + m \cdot (g - a) \cdot x_1 \quad (3.15)$$

$$L_{TOT} = m \cdot g \cdot (2 \cdot x_1 + x_3) \quad (3.16)$$

Come per il carrello, anche per i bracci di carico la massa è variabile a seconda se essi trasportano il carico oppure no.

L'implementazione dei calcoli energetici descritti viene effettuata su Plant Simulation attraverso dei metodi e delle tabelle. In particolare, sono state create due tabelle, una per i consumi relativi ai movimenti lungo l'asse x ed un'altra per i consumi lungo l'asse z, che raccolgono le informazioni ed elaborano le potenze di ogni movimentazione eseguita durante la simulazione, praticando un tracking dei consumi.

Consumi energetici lungo l'asse x. In Plant Simulation, all'interno degli oggetti, è possibile inserire dei metodi *Observers*. Tali metodi osservano, in ogni istante della simulazione, un determinato parametro relativo all'oggetto in cui sono stati inseriti. Al fine di effettuare il *tracking* della potenza erogata per ogni singolo evento che si verifica durante la simulazione, è stato creato un *Observer*, all'interno dell'oggetto *Carrello*. L'*Observer* in questione è chiamato *OnCurrentSpeedChanged* e osserva, in ogni istante, la velocità del carrello in cui è stato inserito, attivandosi ogni qual volta se ne verifica una variazione. In particolare, non appena la velocità del carrello diventa diversa da zero, il metodo scrive in una tabella, registrando nella prima riga libera alcune informazioni relative al carrello: gantry di appartenenza, numero dei bracci di carico, velocità, accelerazione, numero di entità sul carrello, posizione ed istante di tempo iniziali. Il metodo, poi, attende che la velocità ritorni nuovamente nulla e completa la riga iniziata, registrando la posizione e l'istante di tempo finali. In definitiva, per ogni riga, relativa ad una determinata movimentazione, si hanno tutti i dati necessari per calcolare l'intervallo di tempo, lo spostamento, l'energia consumata e la potenza (secondo il metodo descritto).

Consumi energetici lungo l'asse z. Il metodo ESEGUI_MISSIONE, che si trova all'interno dell'oggetto *Carrello*, ogni volta che dà il via alla discesa/salita di un braccio di carico, registra, nella prima riga libera di una tabella, tutte le informazioni riguardanti quella determinata movimentazione. Come già detto, non sono stati modellizzati i bracci di carico e le pinze, dunque non esiste un oggetto di cui rilevare la posizione iniziale e finale. Tuttavia, l'azienda oggetto di analisi ha fornito, oltre alla velocità e l'accelerazione, anche i tempi di salita/discesa e lo spostamento verticale percorso per ogni braccio di carico. Anche in questo caso, dunque, si hanno a disposizione, per ogni riga, tutte le informazioni necessarie per calcolare l'energia e la potenza spese per ogni movimentazione verticale. Inoltre, per ogni riga, si registra, con un booleano (true o false), se la movimentazione comprende un'operazione di apertura/chiusura della pinza e, in caso positivo, il metodo aggiunge, al consumo energetico dovuto alla movimentazione lungo l'asse z, un consumo energetico fisso dovuto proprio al motore della pinza.

3.6 Verifica e validazione del modello

Durante la costruzione del modello di simulazione è necessario verificare se esso funziona correttamente. Per raggiungere tale proposito, sono state utilizzate diverse tecniche.

- Il modello è stato programmato e sottoposto al debugger in fasi, cioè non è stato scritto l'intero programma prima di iniziare il debug, ma è stato definito un programma base, non troppo dettagliato, a cui, poi, sono stati aggiunti man mano diversi livelli di dettaglio, come se fossero delle variabili dummies. Ciò vuol dire che ogni metodo, all'interno del modello, è una variabile binaria che può assumere i valori 0 e 1: quando è 0 il metodo è “spento”, mentre quando è 1 il metodo è “acceso”. Ciò può essere eseguito in Plant Simulation tramite degli strumenti di interfaccia, chiamati *CheckBox*, che, con un click, possono assumere due valori, *true* o *false*. Ad ogni metodo è stata collegata una *Checkbox* che può attivarlo o disattivarlo a seconda delle necessità.
- È stato utilizzato un debugger interattivo per verificare che ogni “percorso logico” del programma fosse corretto. Plant Simulation è dotato di un debugger che consente di interrompere la simulazione in un momento specifico e di esaminare ed eventualmente modificare i valori di determinate variabili. Quest'ultima capacità può essere utilizzata per “forzare” il verificarsi di determinati tipi di errori.
- È stata osservata l'animazione dell'esecuzione della simulazione, che consente di verificare che tutto funzioni correttamente. Come già descritto nel Paragrafo 3.1.1, l'animazione consente di verificare se ci sono stazioni di lavoro in blocco o, in generale, anomalie che impediscono il normale avanzamento delle entità all'interno del modello. Se ciò avviene, è necessario, con il debugger, risalire alla causa di tale comportamento scorretto, che può essere dovuto ad un errore logico o di sintassi all'interno di un metodo oppure ad un'errata impostazione degli oggetti appartenenti al *Material Flow*.
- È stata costruita una statistica di tracking, cioè una tabella in cui vengono registrati i diversi passaggi delle entità all'interno del sistema. Ogni volta che nel sistema entra una nuova entità (albero motore), nella tabella di Tracking viene dedicata una riga a quella entità, dove si tiene traccia degli istanti di tempo in cui essa entra ed esce da ogni stazione di lavoro, fin quando non finisce il suo percorso entrando nel Drain, il quale, come già descritto nel Paragrafo 3.1.1, serve a “farla uscire” dal sistema. Per realizzare la statistica

appena descritta, è stato inserito un metodo *OnLocationChanged* all'interno della Classe Entità, che si attivi ogni qual volta un'entità si sposti in una nuova stazione di lavoro, registrandone il tempo di ingresso. Per registrare il tempo di uscita è stato impostato, invece, un metodo *OnExit* in ogni stazione di lavoro, che si attivi nel momento in cui l'entità esca dalle stazioni stesse. Grazie alla statistica appena descritta è stato possibile, dunque, tracciare il passaggio di ogni entità nel Digital Twin e calcolare il suo tempo di permanenza all'interno di ogni stazione di lavoro e, in definitiva, il lead time, cioè il tempo di attraversamento dell'intero sistema. Anomalie all'interno di tale tabella, come, ad esempio, il passaggio di un tipo di entità in una stazione di lavoro non dedicata ad essa, presuppongono un errato funzionamento del modello.

Data l'impossibilità di riportare l'intera tabella di Tracking, a causa delle elevate dimensioni e della grande quantità di dati raccolti, si propone di seguito, per meglio comprendere la tecnica descritta, un esempio di Tracking, che traccia soltanto l'ingresso e l'uscita delle entità dal sistema (Figura 3.27). È importante sottolineare che questa, come ogni altra statistica, è generata soltanto dopo il tempo di warm-up (descritto nel Paragrafo 3.1.1).

Gli istanti di ingresso e di uscita e il lead time di ogni entità, riportati all'interno delle colonne 2, 3 e 4 della tabella sottostante, sono nel formato *time*, caratteristico di Plant Simulation e definito come *gg:hh:mm:ss*, dove *gg* indica i giorni, *hh* le ore, *mm* i minuti e *ss* i secondi. È importante sottolineare che la prima riga registrata in tabella non si riferisce alla prima entità generata dal sistema, ma alla numero 1825, che entra, nel sistema stesso, dopo un giorno e 52 secondi dall'inizio della simulazione. Ciò è dovuto al fatto che la compilazione della tabella viene effettuata a partire dalla fine del tempo di warm-up, definito proprio pari ad un giorno (*1:00:00:00.0000*).

	integer 0	string 1	time 2	time 3	time 4
string	ALBERO MOTORE	TIPO	ISTANTE INGRESSO	ISTANTE USCITA	LEAD TIME
1	1825	B2	1:00:00:52.0000	1:11:58:14.3100	11:57:22.3100
2	1826	A	1:00:00:52.0000	1:12:43:50.8989	12:42:58.8989
3	1827	B2	1:00:05:32.0000	1:12:35:24.9877	12:29:52.9877
4	1828	A	1:00:05:32.0000	1:10:43:08.6303	10:37:36.6303
5	1829	B2	1:00:16:28.0000	1:11:25:33.4500	11:09:05.4500
6	1830	A	1:00:16:28.0000	1:11:52:51.4751	11:36:23.4751
7	1831	B2	1:00:19:40.0000	1:12:24:12.3345	12:04:32.3345
8	1832	A	1:00:19:40.0000	1:10:50:14.3504	10:30:34.3504
9	1833	B2	1:00:20:58.0000	1:12:34:39.9877	12:13:41.9877
10	1834	A	1:00:20:58.0000	1:13:41:08.9098	13:20:10.9098

Figura 3.27: Esempio parziale di Tracking relativo al primo scenario produttivo

Diversa dalla verifica è la validazione del modello, che riguarda la determinazione di quanto accuratamente tale modello di simulazione rappresenti il sistema reale. La tabella di tracking appena descritta, oltre a permettere un più accurato debugging del sistema per i motivi visti sopra, costituisce un vero e proprio strumento di validazione del modello, in quanto permette all'azienda e, in particolare, al personale esperto dell'impianto, di verificare la correttezza del flusso produttivo rappresentato. Ad esempio, è possibile verificare che un'albero motore di tipo A, passi effettivamente nelle stazioni di lavoro ad esso dedicate e che il tempo di permanenza all'interno dei macchinari corrisponda a quello reale. I tempi di attraversamento, calcolati per ogni stazione di lavoro e per l'intero sistema (lead time), sono stati confrontati con quelli dell'impianto attuale "as is", per confermarne la coerenza.

Ovviamente la simulazione di un sistema complesso può essere soltanto un'approssimazione del sistema reale. Ciò è ancora più vero per il sistema analizzato, il cui modello è rappresentativo dello scenario "to be", che si avrà in seguito alla riconversione dell'impianto stesso. Inoltre, la complessità ed il livello di dettaglio devono essere coerenti con gli obiettivi dello studio: i modelli non sono universalmente validi, ma sono progettati per determinati scopi.

Oltre alla creazione della tabella di tracking, le procedure di convalida eseguite sono state le seguenti.

- Tutte le ipotesi effettuate sul modello e le logiche implementate sono state riviste e concordate dall'azienda oggetto di studio. È stato necessario lavorare a stretto contatto con le persone esperte del sistema, per ottenere informazioni complete e accurate. Ad esempio, la metodologia di calcolo dei consumi energetici dei gantries non è basata su precise misure sperimentali date da sensori che descrivono il profilo di carico, ma su equazioni il cui grado di accuratezza dipende in primo luogo dalla quantità e dalla qualità dei dati forniti dall'impresa.
- Il personale esperto del sistema ha effettuato un'analisi statica del processo produttivo "to be" tramite Excel, che ha consentito di ottenere un target di produzione da confrontare con quello di simulazione. I dati di input utilizzati per tale analisi, sono stati stabiliti a partire dal sistema attuale "as is".

In generale è impossibile convalidare un modello di simulazione completamente, anche perchè alcune parti del sistema potrebbero non esistere ancora nella realtà. Nel sistema in esame, infatti, ci sono alcune stazioni di lavoro, come la OP70_NEW e la OP90_5, che sono ancora in fase di progettazione. Tuttavia, il confronto tra

gli outputs di simulazione e quelli ottenuti tramite un'analisi statica, rappresenta la tecnica di convalida più robusta.

Per il sistema analizzato è stata creata una statistica che registri in ordine l'istante di uscita di ogni singolo pezzo dall'impianto e calcoli, quindi, il takt time (ritmo di produzione), cioè l'intervallo di tempo che intercorre tra due uscite consecutive. Per realizzare la statistica in questione, è stato inserito un metodo *OnExit* all'interno del Drain del sistema, che scriva una riga di una tabella ogni volta che un'entità esce dal sistema.

Come si vede dall'esempio riportato in Figura 3.28, relativo al primo scenario produttivo, il takt time non è costante, nonostante i dati registrati siano stati presi in assenza di guasti, cioè quando il sistema funziona al 100% dell'efficienza. La variabilità è data dalle movimentazioni dei gantries, che non sempre sono fluide e fanno variare il tempo ciclo dell'impianto.

Nella seguente tabella, come per la tabella di tracking, le colonne 2 e 3 sono nel formato *time* caratteristico di Plant Simulation: *gg:hh:mm:ss*.

	string 1	time 2	time 3
string	TIPO ALBERO MOTORE	ISTANTE USCITA	TAKT TIME
1	B2	1:00:00:43.7500	
2	A	1:00:00:58.3667	14.6167
3	B2	1:00:02:16.2400	1:17.8733
4	A	1:00:02:26.3467	10.1067
5	B2	1:00:03:43.7300	1:17.3833
6	A	1:00:03:58.9267	15.1967
7	B2	1:00:05:11.2200	1:12.2933
8	A	1:00:05:58.9067	47.6867
9	B2	1:00:06:50.7100	51.8033
10	A	1:00:07:26.4867	35.7767

Figura 3.28: Tabella parziale di calcolo del Takt Time relativa al primo scenario produttivo

Un albero motore, infatti, non passa direttamente da un macchinario di lavorazione ad un altro, ma deve attendere di essere trasportato dal gantry. Tale attesa varia di volta in volta a seconda dello stato del sistema.

Date le rilevazioni dei takt time, registrate in tabella, è possibile eseguire un'analisi statistica dei dati raccolti e calcolarne, in particolare, la media. Nella Tabella 3.5 si riportano i valori medi dei takt time relativi ai tre scenari analizzati.

Il takt time medio corrisponde al tempo ciclo medio dell'impianto, da cui può essera stimata, di conseguenza, la produttività del sistema.

Tabella 3.5: Takt Time medi relativi ai tre scenari analizzati

Takt Time medio [s]		
Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
52,26	53,43	53,92

La produttività o il tempo ciclo ottenuti tramite la simulazione dovrebbero essere confrontati con quelli del sistema reale. Tuttavia, come già detto, avendo costruito un Digital Twin rappresentativo di scenari produttivi non ancora implementati nelle realtà, non si hanno a disposizione dati con cui effettuare effettivamente un confronto. Dunque, la validazione si è basata sull'analisi statica svolta dall'impresa oggetto di studio e sull'esperienza e sul giudizio del personale esperto in materia dell'impianto. L'analisi statica è un'analisi deterministica, in cui, cioè, non sono presenti elementi casuali, come i guasti dei macchinari. Per questo motivo, al fine di effettuare il confronto, le simulazioni sono state eseguite anch'esse in assenza di guasti.

Da tale confronto, è stato possibile osservare di quanto la produzione annuale, ottenuta tramite la simulazione, si discosta da quella calcolata staticamente. In particolare:

- Scenario 1 $\rightarrow -6,0 \%$
- Scenario 2 $\rightarrow -11,4 \%$
- Scenario 3 $\rightarrow -6,2 \%$

Il fatto che il risultato di simulazione sia inferiore rispetto a quello derivante dall'analisi statica, è dovuto soprattutto all'impossibilità di tener conto, in quest'ultima, delle molteplici interazioni dei sistemi di movimentazione dell'impianto. Considerare tali interazioni significa valutare i tempi di carico, trasporto e scarico delle entità, nonché le attese dovute al fatto che i macchinari di lavorazione o i conveyors possano essere saturi e che i gantries possano essere impegnati in altre movimentazioni. Inoltre, come descritto nel Paragrafo 3.4.2, può succedere che un'entità venga trasportata all'interno di un gantry buffer prima di entrare o di uscire da una stazione di lavoro. Tutte queste attese, dunque, aumentano il lead time di un'entità all'interno del sistema e, di conseguenza, fanno diminuire la produzione. Con un'analisi statica in cui, per l'ingente quantità di dati da gestire, è difficile definire con precisione lo stato del sistema in ogni istante, non si tiene conto completamente di tutte le attese

e, dunque, la produzione è superiore rispetto a quella risultante dalla simulazione. In ogni caso, gli esperti del processo hanno confermato la coerenza e, dunque, la validità degli outputs ottenuti.

Se l'impresa avesse fornito un tempo ciclo teorico, si sarebbe potuto procedere, in modo immediato, al calcolo della produzione teorica oraria della linea di lavorazione ($\frac{3600}{TC[s]}$). Il tempo ciclo dell'impianto (TC), infatti, indica ogni quanti secondi un prodotto finito esce dal sistema. Dunque, a partire da esso, è facilmente calcolabile il numero di pezzi prodotti ogni ora. In assenza di guasti, tale produzione teorica dovrebbe essere uguale a quella del modello di simulazione.

Per effettuare questa verifica, è necessario calcolare il rapporto tra il risultato di simulazione, *Throughput Per Hour*, e il risultato teorico (Formula 3.17).

$$Efficienza = \frac{ThroughputPerHour}{\frac{3600}{TC[s]}} \cdot 100 \quad (3.17)$$

La simulazione, in assenza di guasti, può considerarsi valida se il risultato della 3.17 risulta pari al 100%. Qualora l'efficienza non fosse al 100%, la simulazione sarebbe da considerarsi errata e si renderebbe necessaria l'individuazione del collo di bottiglia lungo le linee del modello per eliminarlo.

Per far questo è sufficiente osservare le informazioni statistiche presenti all'interno di ogni *SingleProc*, che indicano le percentuali di *Working Time*, *Blocking Time* e *Waiting Time* di ogni singola risorsa produttiva. Se il *Working Time* è uguale al 100%, allora non c'è nessun problema di efficienza in quella determinata stazione di lavoro; se il *Blocking Time* è maggiore di zero, allora il problema è da ricercare a valle della stazione (blocco allo scarico); infine, se il *Waiting Time* è maggiore di zero il problema è da ricercare a monte della stazione di lavoro (mancato carico).

Nel caso studio analizzato, il tempo ciclo dell'impianto non dipende solo dai tempi ciclo delle stazioni di lavoro, ma anche dalle dinamiche di movimentazione delle entità. Infatti, come già visto, esso non è un valore costante, ma è funzione del tipo di albero motore lavorato e, in generale, dello stato del sistema, dal quale, di volta in volta, dipendono le movimentazioni dei gantries.

Dunque, in questo caso, per l'ingente quantità di dati da gestire, il tempo ciclo, non può essere determinato ex-ante, ma solo in seguito ad uno studio di simulazione. Per questo motivo, l'analisi statica eseguita dall'impresa oggetto di studio, è stata fondamentale ai fini di validazione del modello.

In ultima analisi, è importante sottolineare come, estendendo il modello di simulazione con l'attivazione dei profili energetici di stazioni e conveyors e con l'aggiunta dei metodi che analizzano la potenza erogata dai gantries nel tempo, si crea una fitta rete che consente il calcolo dei consumi energetici, senza, tuttavia, influenzare i metodi già esistenti ed il modello di flusso del materiale.

3.7 Progettazione degli esperimenti

Anche se si è parlato di metodi con codici scritti al loro interno, la simulazione non è un semplice esercizio di programmazione, ma è un vero e proprio esperimento di campionamento statistico. Infatti, al fine di ottenere dei dati di output ed analizzarli, è necessario costruire degli esperimenti. Un esperimento è un processo il cui risultato non è noto con certezza. Tutti i possibili risultati prendono il nome di punti campione, e il loro insieme è detto spazio campionario ed è indicato con S .

Poiché la maggior parte dei modelli di simulazione utilizza come input variabili casuali, i dati di output sono anch'essi casuali e occorre prestare attenzione nel trarre conclusioni sulle reali caratteristiche del modello.

Nel modello in esame le due principali fonti di casualità sono:

- L'intervallo di guasto dei macchinari, caratterizzato da una distribuzione esponenziale negativa.
- Il tempo di riparazione dei macchinari, che segue una distribuzione di Erlang.

La distribuzione esponenziale negativa è una distribuzione continua. Una variabile appartenente ad essa può assumere solo valori reali positivi e la sua funzione di densità di probabilità è la seguente.

$$f(x, \lambda) = \begin{cases} \lambda \cdot e^{-\lambda x} & \text{se } x \geq 0 \\ 0 & \text{se } x < 0 \end{cases} \quad (3.18)$$

Tale distribuzione è utilizzata per visualizzare il tempo tra due eventi indipendenti. La sua media (o valore atteso) è pari a $\mu = \beta = \frac{1}{\lambda}$, mentre la sua varianza è uguale a $\sigma = \beta^2$.

Nel modello analizzato, il parametro β indica il Mean Time Between Failures (MTBF), cioè il tempo medio in secondi che intercorre tra due eventi di guasto dei macchinari, ed è assunto pari a 20 minuti (Figura 3.29).

Anche la distribuzione di Erlang è una distribuzione continua. Essa è data dalla somma di k variabili casuali indipendenti e identicamente distribuite secondo una distribuzione esponenziale. Come per l'esponenziale, una variabile appartenente alla distribuzione di Erlang, può assumere soltanto valori reali positivi. La funzione di densità di probabilità è la seguente.

$$f(x, \lambda) = \begin{cases} \lambda \cdot \frac{(x\lambda)^{k-1}}{(k-1)!} \cdot e^{-\lambda x} & \text{se } x \geq 0 \\ 0 & \text{se } x < 0 \end{cases} \quad (3.19)$$

Il tempo di attesa necessario affinché un macchinario venga riparato segue una distribuzione di Erlang. Il valore atteso è pari a $\mu = \frac{k}{\lambda} = k \cdot \beta$, mentre la varianza è uguale a $\sigma = k \cdot \beta^2$.

In questo caso, i parametri che bisogna inserire nel modello di simulazione sono la media μ , che corrisponde al Mean Time To Repair (MTTR), cioè il tempo medio di riparazione che è assunto pari a 5 minuti, e la deviazione standard σ , pari a 4 minuti (Figura 3.29).

Come si evince dall'immagine 3.29, inserendo su Plant Simulation le distribuzioni descritte con i relativi parametri, si genera in modo automatico il valore della Disponibilità (*Availability*) del sistema che, in questo caso, sarà uguale all'80% (Formula 3.20).

Figura 3.29: Impostazione dei guasti nel modello di simulazione

$$Availability = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} = \frac{20}{20 + 5} = 0.8 \quad (3.20)$$

Date le due fonti di casualità appena descritte, è necessario progettare degli esperimenti, uno per ogni scenario, che permetta di osservare le variabili di output.

In Plant Simulation è presente uno strumento, chiamato Experiment Manager (Figura 3.30), che consente di effettuare diversi esperimenti per il sistema in esame.

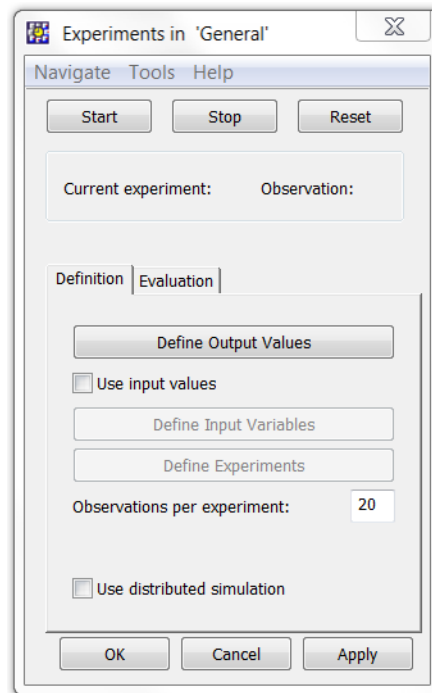


Figura 3.30: Experiment Manager di Plant Simulation

La durata della simulazione sarà impostata a dieci giorni, con un tempo di warm-up pari ad un giorno. Come si evince dalla Figura 3.30, è necessario definire quali sono le variabili di output che l'Experiment Manager dovrà osservare. Inoltre, è possibile impostare il numero di osservazioni, cioè il numero di replicazioni indipendenti che si vogliono effettuare per ogni esperimento. Le osservazioni rappresentano il campione a cui appartiene ogni valore di output.

Di ognuno dei tre scenari sono state eseguite 10 osservazioni, e gli indicatori scelti come variabili di output sono il consumo energetico orario del sistema (diviso in consumo energetico dei gantries e consumo energetico dei macchinari) ed il *throughput per hour* (JPH).

Siano $y_{11}, y_{12}, \dots, y_{1m}$ le variabili risultanti dall'esecuzione di una singola simulazione di lunghezza m . Ad esempio y_{1j} potrebbe essere il consumo energetico nell'ora j -esima del sistema in esame. A causa della natura casuale di alcune variabili in input, ogni volta che si esegue la simulazione di uno stesso scenario, si ottengono differenti valori delle variabili casuali $Y_1, Y_2, \dots, Y_m$. Se si eseguono n indipendenti replicazioni della simulazione e ciascuna replicazione utilizza le stesse condizioni ini-

ziali, si ottengono le seguenti osservazioni per una determinata variabile di output di un determinato scenario.

$$\begin{array}{ccccc} y_{11} & \cdots & y_{1j} & \cdots & y_{1m} \\ y_{21} & \cdots & y_{2j} & \cdots & y_{2m} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ y_{n1} & \cdots & y_{nj} & \cdots & y_{nm} \end{array}$$

Le variabili presenti all'interno della stessa riga chiaramente non sono indipendenti, poiché appartengono allo stesso *run* di simulazione, ma le variabili appartenenti alla stessa colonna possono essere considerate osservazioni indipendenti ed identicamente distribuite della variabile casuale Y_i .

Dunque, Y_{ij} è la j -esima rilevazione della replicazione i -esima con $j = 1, 2, \dots, m$ e $i = 1, 2, \dots, n$. Se si vuole ottenere una stima della media del consumo energetico orario con un intervallo di confidenza al 95%, si può procedere con il calcolo della media per ogni riga della matrice, considerando soltanto i valori rilevati dopo il periodo di warmup (Equazione 3.21). L'Experiment Manager, infatti, inizia a raccogliere i dati alla fine del transitorio iniziale, per far sì che le statistiche generate non siano influenzate da dati non allineati al comportamento del sistema nello stato stazionario.

$$\bar{Y}_i = \frac{\sum_{j=l+1}^m Y_{ij}}{m - l} \quad (3.21)$$

Tutte le diverse Y_i calcolate, una per ogni riga, sono variabili indipendenti ed identicamente distribuite e, per esse, possono essere calcolate la media $\bar{Y}(n)$ (3.22) e la varianza $S^2(n)$ (3.23) campionarie, che costituiscono due stimatori non distorti della media μ e della varianza σ^2 della popolazione a cui appartengono i campioni osservati.

$$\bar{Y}(n) = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n} \quad (3.22)$$

$$S^2(n) = \frac{\sum_{i=1}^n [X_i - \bar{X}(n)]^2}{n - 1} \quad (3.23)$$

Infine, l'intervallo di confidenza al 95% ($\alpha = 5\%$) per la media μ , è dato dalla seguente espressione.

$$\bar{Y}(n) \pm t_{n-1, 1-\alpha/2} \sqrt{\frac{S^2(n)}{n}} \quad (3.24)$$

Per lo studio del modello, i parametri n , m e l assumono i valori descritti in Tabella 3.6. Tali valori sono gli stessi per ognuno dei tre esperimenti effettuati.

Tabella 3.6: Definizione dei parametri degli esperimenti

Parametro	Significato	Valore	Impostazione in Plant Simulation
n	Numero di osservazioni (replicazioni) per esperimento	10	Numero di osservazioni impostato all'interno dell'Experiment Manager
m	Numero di rilevazioni per ogni replicazione	240	Durata della simulazione in ore, impostata all'interno dell'Event Controller
l	Numero di rilevazioni scartate di una singola replicazione	24	Durata del tempo di warm-up in ore, impostata all'interno dell'Event Controller

Come si evince dalla Tabella 3.6, il *time horizon* di simulazione, cioè il periodo di tempo simulato, è pari a dieci giorni.

Ciò che cambia, da un'esperimento all'altro, sono la tipologia di prodotti generati dalla sorgente del modello (Source). Dunque, oltre all'impostazione dei tre parametri, m , n e l , prima di dare avvio all'Experiment Manager cliccando sul *button* "Start", è necessario completare una tabella con il mix produttivo in base allo scenario che si intende analizzare (Figura 3.31).

	string 0	real 1	real 2
string		MIX TEORICO	PRODUZIONE
1	A	50.00	
2	B1	0.00	
3	B2	50.00	

Figura 3.31: Tabella per l'impostazione del mix produttivo

Nella colonna 1 di tale tabella, si devono inserire le percentuali che si intende produrre per ogni tipologia di prodotto. La somma delle tre percentuali inserite deve essere sempre uguale a 100.

I tre esperimenti effettuati (Tabella 3.7) prevedono la definizione delle percentuali in base ai tre scenari oggetto di studio. Tali percentuali, descritte nel Paragrafo 3.3 e rappresentative del mix produttivo teorico, prendono il nome di Variabili Decisionali, che sono quelle variabili indipendenti che rappresentano gli input del modello e i cui valori differiscono da un esperimento all'altro.

Tabella 3.7: Definizione delle Variabili Decisionali

Esperimento	Mix Produttivo Teorico
1	50% A e 50% B2
2	50% B1 e 50% B2
3	100% B2

La tabella, rappresentata in Figura 3.31, viene letta da un metodo *OnEntrance* all'interno della Source del modello. Infatti, ogni qual volta la Source genera un'entità, si stabilisce il tipo di entità generata (cioè la tipologia di albero motore che essa rappresenta) e si incrementa di uno la casella della colonna PRODUZIONE, in corrispondenza della riga relativa al tipo di albero motore generato. La scelta dell'entità da generare avviene nel seguente modo.

Per ogni riga i della tabella (Figura 3.31), si verifica la seguente condizione.

$$\frac{\text{Quantità Prodotta } [i]}{\text{Quantità Totale Prodotta}} \leq \frac{\text{Quantità da Produrre } [i]}{\text{Quantità Totale da Produrre}} \quad (3.25)$$

Se essa è soddisfatta per la riga i -esima, allora viene generato l'albero motore corrispondente a tale riga.

Prendendo come esempio il primo scenario, se è verificata la condizione 3.26 per la riga 1, allora l'entità generata assumerà le caratteristiche dell'albero motore A e verrà incrementata di un'unità la quantità presente all'interno della casella appartenente alla colonna PRODUZIONE, in corrispondenza della prima riga.

$$\frac{\text{Quantità Prodotta } [1]}{\text{Quantità Totale Prodotta}} \leq \frac{50}{100} \quad (3.26)$$

In altre parole, in un determinato istante di simulazione, si sceglie di generare l'albero motore la cui percentuale prodotta (rispetto alla quantità totale di alberi motori prodotti) sia inferiore o uguale alla percentuale che deve essere prodotta (secondo le condizioni dettate dal mix produttivo impostato).

Dopo aver definito le Variabili Decisionali e la modalità con cui esse vengono implementate nel modello di simulazione, si può procedere all'identificazione delle Variabili Indipendenti che, pur influenzando il risultato degli esperimenti, non variano da un esperimento all'altro. Tali fattori possono essere raggruppati in due classi (Tabella 3.8), i Fattori Controllabili (o deterministici) e quelli Non Controllabili (o stocastici), ai quali, durante la costruzione del modello, come descritto nei Paragrafi 3.4 e 3.5, sono stati attribuiti appropriati valori numerici.

A questo punto, l'Experiment Manager è pronto per eseguire i diversi *run* di simulazione, al fine di calcolare il consumo energetico orario del sistema (Variabile Dipendente).

É importante sottolineare che Plant Simulation, essendo un software di simulazione ad eventi discreti (come descritto nel Paragrafo 3.1.1), prende in considerazione solo quei punti nel tempo (eventi), che sono rilevanti per l'ulteriore corso della simulazione. Tali eventi sono, ad esempio, l'ingresso di un'entità in una stazione di lavoro, la sua uscita o lo spostamento su di un'altro macchinario. Le altre movimentazioni, tra un evento e il successivo, sono di scarso interesse per la simulazione. Dunque, a differenza di tutte le simulazioni *time-oriented*, in Plant Simulation non è possibile definire un vero e proprio *time-step* di simulazione, dal momento in cui il software salta tutti gli istanti temporali che non sono considerati di interesse. Uno dei principali vantaggi che ne deriva, è la possibilità di simulare intervalli di tempo molto lunghi, anche di anni, in pochi minuti. Ciò è molto utile, in questo caso studio, poiché si vogliono simulare differenti scenari produttivi dello stesso sistema ed effettuare numerose repliche per ognuno di essi.

All'interno del modello è stato inserito un *generatore di metodi* che ogni ora registri in una variabile il consumo energetico orario aggiornato relativo ai diversi elementi presenti nel sistema. Tale variabile è proprio la variabile di output che l'Experiment Manager osserverà nel corso della simulazione. Ogni ora essa assumerà un diverso valore, che verrà rilevato dall'Experiment Manager ai fini della generazione delle statistiche finali. É importante sottolineare che un run di simulazione costituisce una singola replicazione all'interno di un esperimento.

L'Experiment Manager effettuerà in modo automatico i diversi calcoli descritti e, infine, restituirà i risultati relativi allo scenario analizzato, che saranno descritti nel Paragrafo 3.8.

Tabella 3.8: Classificazione delle variabili indipendenti comuni agli esperimenti

	Fattori Controllabili	Fattori Non Controllabili
Tempi di Processo	X	
Tempi di Setup	X	
Potenza nello stato lavorativo (macchinari)	X	
Potenza nello stato di setup (macchinari)	X	
Potenza nello stato operativo (macchinari)	X	
Potenza dei conveyors	X	
Velocità dei conveyors	X	
Massa del carrello del gantry	X	
Massa del braccio del gantry	X	
Massa degli alberi motore	X	
Coefficiente di attrito	X	
Velocità asse x Gantry	X	
Velocità asse y Gantry	X	
Accelerazione asse x Gantry	X	
Accelerazione asse y Gantry	X	
Tempo salita braccio Gantry	X	
Tempo discesa braccio Gantry	X	
MTTR del sistema		X
Efficienza del sistema		X

3.8 Analisi degli output

Come è stato ampiamente descritto nel Paragrafo 3.7, il valore osservato dall'Experiment Manager è il consumo di energia orario del sistema. Esso è dato dalla somma di tre fonti di consumo:

- Energia elettrica utilizzata per la movimentazione dei gantries.
- Energia elettrica utilizzata per la movimentazione dei conveyors.
- Energia elettrica utilizzata dai macchinari di lavorazione.

Mentre per i gantries è stata realizzata, come visto nel Paragrafo 3.6.7, una tabella di tracking che identifica il consumo energetico di ogni singola movimentazione, per le stazioni di lavoro ed i conveyors è stato possibile utilizzare uno strumento ausiliario di Plant Simulation, chiamato Energy Analyzer.

L'Energy Analyzer è uno strumento che analizza, durante il *run* di simulazione, i consumi energetici di tutti gli oggetti inseriti al suo interno, leggendone i profili energetici, definiti nel Paragrafo 3.6.2.

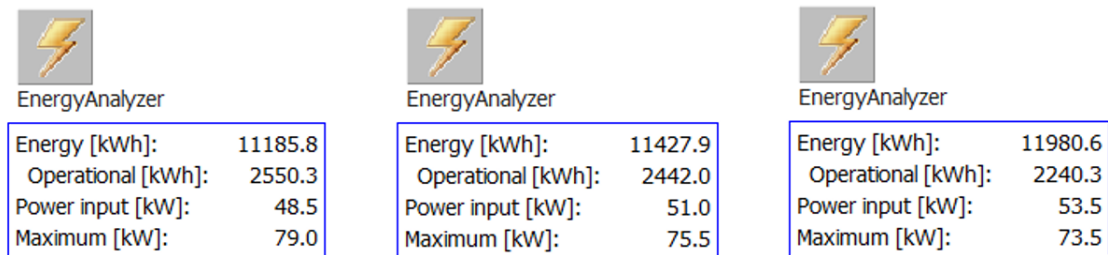


Figura 3.32: Interfaccia Energy Analyzer per i macchinari di lavorazione negli scenari 1, 2 e 3 (da sinistra verso destra)

Per inserire gli oggetti da analizzare è sufficiente effettuare un'operazione di drag-and-drop (cliccare su un oggetto virtuale per trascinarlo sopra l'Energy Analyzer, dove viene rilasciato). Come si evince dalla Figura 3.32, per ogni scenario è possibile visualizzare i consumi energetici relativi ai macchinari di lavorazione, distinguendo tra:

- Energia Totale Consumata
- Energia Consumata nello stato operativo
- Potenza Media erogata
- Potenza Massima erogata

In particolare l'energia consumata nello stato operativo, quando il macchinario è attivo ma non sta processando nessun prodotto, è un'energia Non-Value Added, dunque, il valore di consumo corrispondente rappresenta un indicatore del possibile risparmio energetico dell'impianto.

Tra gli strumenti di interfaccia dell'Energy Analyzer, è presente una tabella in cui si registrano e si aggiornano i consumi energetici dei macchinari di lavorazione e dei conveyors, distinguendoli in base ai diversi stati degli oggetti (working, operational, failed, setting-up). In definitiva, a partire da tale tabella e dalla tabella dei consumi energetici dei gantries, si calcola, ogni ora, il consumo energetico totale del sistema. Esso è sempre differente poiché dipende dai guasti che possono verificarsi nell'impianto, dalle movimentazioni dei gantries che sono di volta in volta diverse in base allo stato del sistema e, infine, dal tipo di mix produttivo dato in input al sistema.

Nelle Tabelle 3.9, 3.10 e 3.11, sono riportati i risultati generati dall'Experiment Manager per i tre diversi scenari produttivi. È importante sottolineare come, all'interno del consumo energetico dei macchinari che eseguono le lavorazioni, sono compresi anche i consumi energetici dei conveyors.

Come per i consumi energetici, è stata analizzata con l'Experiment Manager anche la produzione oraria del sistema, i cosiddetti *Jobs Per Hour* (JPH), i quali, però, non possono essere divulgati, in quanto costituiscono dati sensibili aziendali.

Come si evince dalle Tabelle 3.9, 3.10 e 3.11, il consumo energetico orario dei gantries, relativo agli scenari 2 e 3, è maggiore rispetto a quello dello scenario 1. Ciò è legato al fatto che, in questi ultimi due scenari, viene prodotto soltanto il tipo B. Infatti, nell'impianto ci sono alcune stazioni di lavoro, dedicate al tipo A (Figura 3.8), che risultano inutilizzate.

Tabella 3.9: Scenario 1: 50% A, 50% B2

	Consumo Energetico Orario (kJ/h)		
	Gantries	Macchinari	Sistema
Mean	8.343,52	186.144,95	194.488,46
Standard Deviation	102,92	1.296,73	1.369,81
Minimum	8.087,71	184.037,60	192.125,31
Maximum	8.539,43	188.564,57	196.881,75
Left interval bound	8.295,33	185.537,85	193.847,15
Right interval bound	8.391,70	186.752,04	195.129,77

Tabella 3.10: Scenario 2: 50% B1, 50% B2

	Consumo Energetico Orario (kJ/h)		
	Gantries	Macchinari	Sistema
Mean	9.147,71	171.310,27	180.457,98
Standard Deviation	256,42	1.080,59	1.337,01
Minimum	8.008,85	168.242,59	176.251,44
Maximum	9.482,70	181.005,61	190.488,31
Left interval bound	8.058,08	162.377,39	170.435,47
Right interval bound	9.476,25	180.243,15	189.719,40

Tabella 3.11: Scenario 3: 100% B2

	Consumo Energetico Orario (kJ/h)		
	Gantries	Macchinari	Sistema
Mean	9.362,05	184.220,59	193.582,64
Standard Deviation	42,43	586,79	623,37
Minimum	9.278,58	183.115,48	192.423,70
Maximum	9.448,82	185.270,11	194.718,93
Left interval bound	9.342,19	183.945,87	193.290,80
Right interval bound	9.381,92	184.495,31	193.874,49

Questo inutilizzo fa sì che, in determinati punti dell'impianto, ad esempio a monte delle OP50, OP60 e OP70 (Figura 3.8), si generino delle code, le quali, per essere smaltite, necessitano di molte più movimentazioni da parte dei gantries. Questi ultimi, infatti, si troveranno con più frequenza a dover movimentare le entità di tipo B, oltre che nelle stazioni di lavoro e al di fuori di esse, anche nei *drip tray buffer* al loro interno, per cercare di liberare il più possibile i conveyors a monte e a valle.

Essendo aumentato il numero di entità di tipo B e rimanendo invariata la quantità di stazioni ad esse dedicate, infatti, i gantries devono utilizzare maggiormente i *drip tray buffer*, posizionando le entità al loro interno, prima di movimentarle sulle stazioni stesse.

Inoltre, le stazioni di lavoro OP60 e OP70 dedicate al tipo A (Figura 3.8), non sono gestite da un gantry, ma gli alberi motore arrivano ad esse solo tramite con-

veyors. Ciò implica che, nello scenario 1, nel punto dell'impianto appena descritto, soltanto la metà degli alberi motore prodotti (B2) sono destinati alle stazioni di lavoro gestite da gantries. Di conseguenza, tali gantries hanno meno prodotti da gestire e devono effettuare meno movimentazioni.

Per evidenziare meglio l'impatto delle movimentazioni dei gantries sul sistema, è possibile eseguire una simulazione senza guasti. Da essa possono essere estrapolati i grafici che mostrano la percentuale di tempo in cui le stazioni lavorano. Di seguito si mostrano gli istogrammi relativi allo stato di quelle risorse che sono critiche per i diversi scenari: OP80, OP90 e OP100. Nei grafici il colore verde indica lo stato della risorsa quando lavora, mentre il colore giallo indica un blocco per mancato scarico.

Nello scenario 1 si può notare che le stazioni OP100 non sono equilibrate in termini di saturazione: infatti, una sola delle tre stazioni è destinata al prodotto di tipo A, che si accumula a monte delle stazioni stesse. Il gantry di queste stazioni, dunque, non riesce a smaltire la coda in ingresso causando il riempimento frequente del conveyor a monte. Il pezzi lavorati attendono per molto tempo di essere scaricati dal gantry, nonostante il conveyor a valle non sia mai saturo.

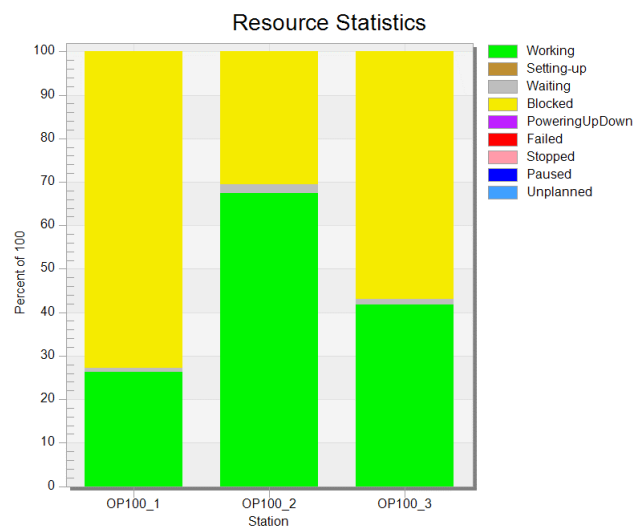


Figura 3.33: Stato delle stazioni OP100 nello scenario 1

Negli scenari 2 e 3 il collo di bottiglia si rileva presso le stazioni OP80, che lavorano per il 55% del tempo, e le OP90, che lavorano per l'80%. Per il restante, esse sono in attesa dello scarico dei pezzi lavorati da parte del gantry. Tale situazione genera il riempimento dei rispettivi conveyor a monte.

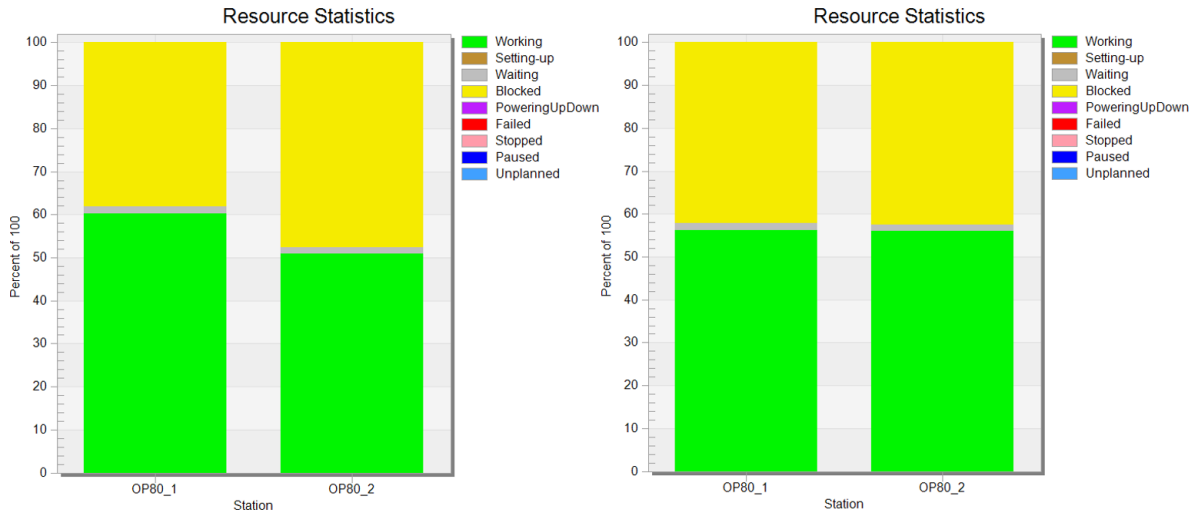


Figura 3.34: Stato delle stazioni OP80 nello scenario 2 (grafico a sinistra) e nello scenario 3 (grafico a destra)

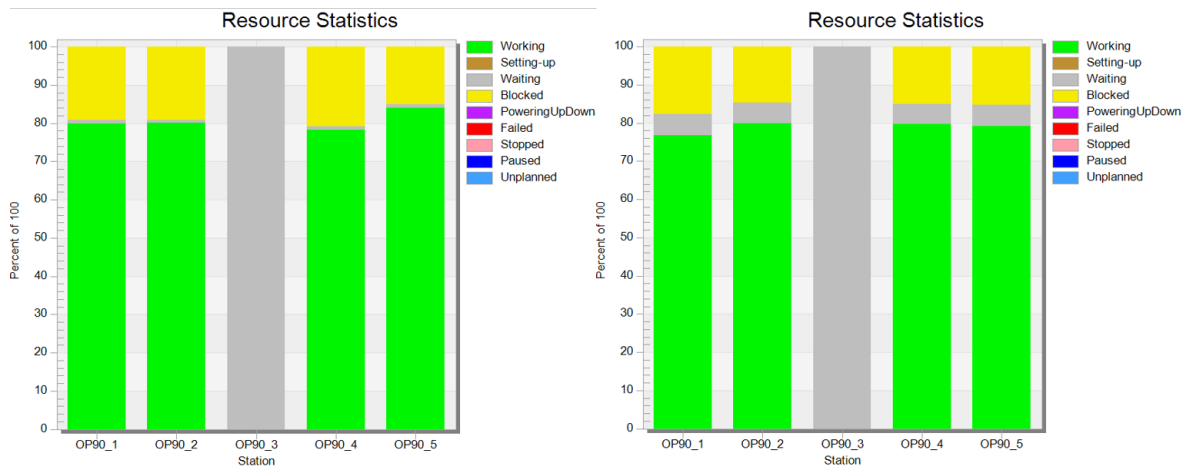


Figura 3.35: Stato delle stazioni OP90 nello scenario 2 (grafico a sinistra) e nello scenario 3 (grafico a destra)

Coerentemente alle maggiori movimentazioni di materiali svolte per trasportare i pezzi in questi punti dell'impianto, si può facilmente rilevare come i gantries che servono le suddette stazioni erogino una potenza maggiore rispetto a quella degli altri gantries.

Per evidenziare questo aspetto, sono stati costruiti degli istogrammi per i tre scenari, che rappresentano con quale frequenza si rilevi, per i gantries, una determinata classe di potenza. Tutte le potenze erogate dai gantries, per ogni singola movimentazione all'interno del sistema, registrate all'interno della tabella di tracking vista precedentemente, sono state divise in base alla classe di appartenenza

(Figura 3.36). Le classi sono state scelte considerando un intervallo di 0,1 kW, dopo aver identificato il minimo e il massimo tra tutti i valori rilevati.

		Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
Classi di Potenza (kW)		Frequenza	Frequenza	Frequenza
0 - 0,1	C1	0,00%	0,00%	0,00%
0,1 - 0,2	C2	1,81%	0,00%	0,00%
0,2 - 0,3	C3	17,45%	17,90%	17,20%
0,3 - 0,4	C4	9,90%	9,80%	11,65%
0,4 - 0,5	C5	24,08%	25,49%	24,78%
0,5 - 0,6	C6	32,79%	33,93%	33,40%
0,6 - 0,7	C7	0,70%	1,45%	1,50%
0,7 - 0,8	C8	2,74%	2,53%	2,68%
0,8 - 0,9	C9	4,27%	3,88%	3,73%
0,9 - 1	C10	0,84%	1,38%	1,53%
1 - 1,1	C11	1,29%	0,07%	0,07%
1,1 - 1,2	C12	4,13%	3,56%	3,47%
	Altro	0,00%	0,00%	0,00%

Figura 3.36: Classi di potenza e relative percentuali per ogni scenario produttivo

Dunque, per ogni scenario, è stata individuata la frequenza di ciascuna classe. I seguenti istogrammi (Figure 3.37, 3.38, 3.39) riguardano soltanto le potenze erogate per le movimentazioni lungo l'asse x, in quanto le potenze sviluppate lungo l'asse z per ogni movimentazione non subiscono variazioni nei diversi scenari.

Da questi istogrammi si evidenzia come generalmente, per una movimentazione lungo l'asse x, i gantry erogano una potenza compresa tra 0.5 e 0.6 kW. Tuttavia, non sono trascurabili potenze più alte, come quella compresa tra 1.1 e 1.2 kW. Grazie alla tabella di tracking energetico si può facilmente risalire al fatto che le potenze più elevate sono generate dal gantry delle stazioni OP100 e da quello delle OP80. Infatti essi sono formati da un carrello rispettivamente con quattro e tre pinze. Il numero maggiore di pinze è coerente con il fatto che essi devono compiere più movimentazioni per soddisfare le esigenze delle stazioni di lavoro. Dal momento in cui la potenza erogata è direttamente proporzionale al peso trasportato dal carrello, il fatto che tali gantries possano trasportare tre o quattro pezzi contemporaneamente, implica che il consumo di potenza sarà sicuramente maggiore.

Tale analisi è molto importante per un dimensionamento corretto dei motori dell'impianto: cioè, prevedendo quale sarà il consumo energetico, si può effettuare il giusto investimento nell'acquisto dei motori dell'impianto, senza dover ricorrere ad un sovradimensionamento che comporterebbe soltanto uno spreco economico.

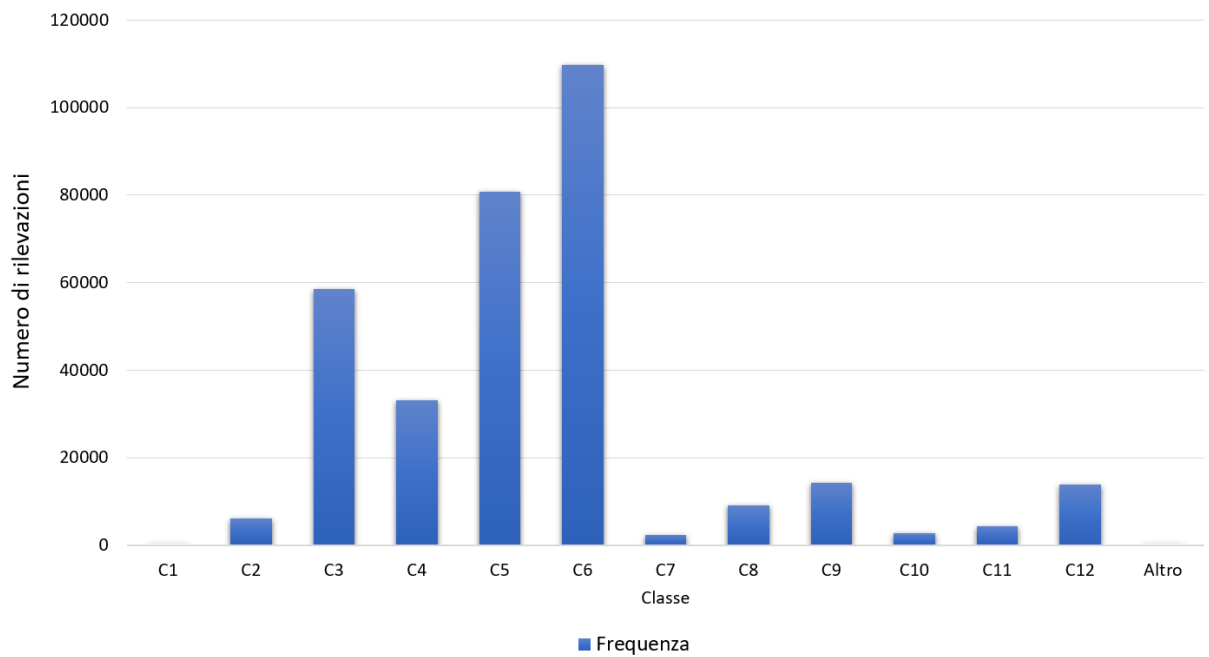


Figura 3.37: Istogramma delle potenze erogate dai gantries lungo l'asse x nello scenario 1

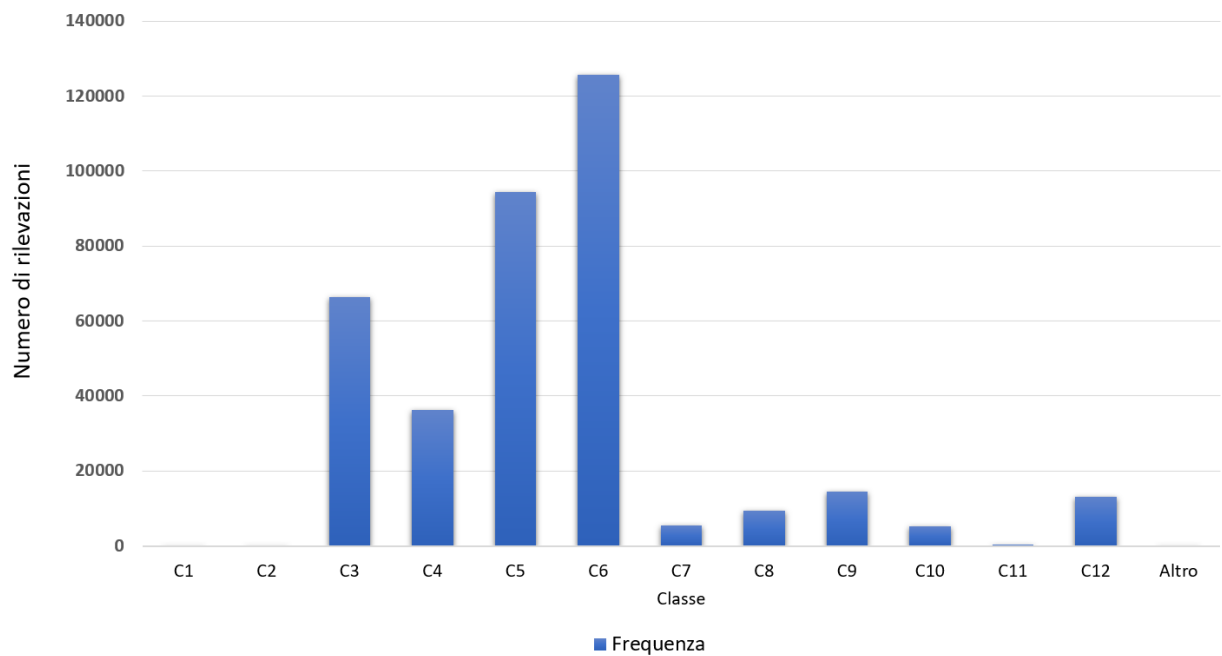


Figura 3.38: Istogramma delle potenze erogate dai gantries lungo l'asse x nello scenario 2

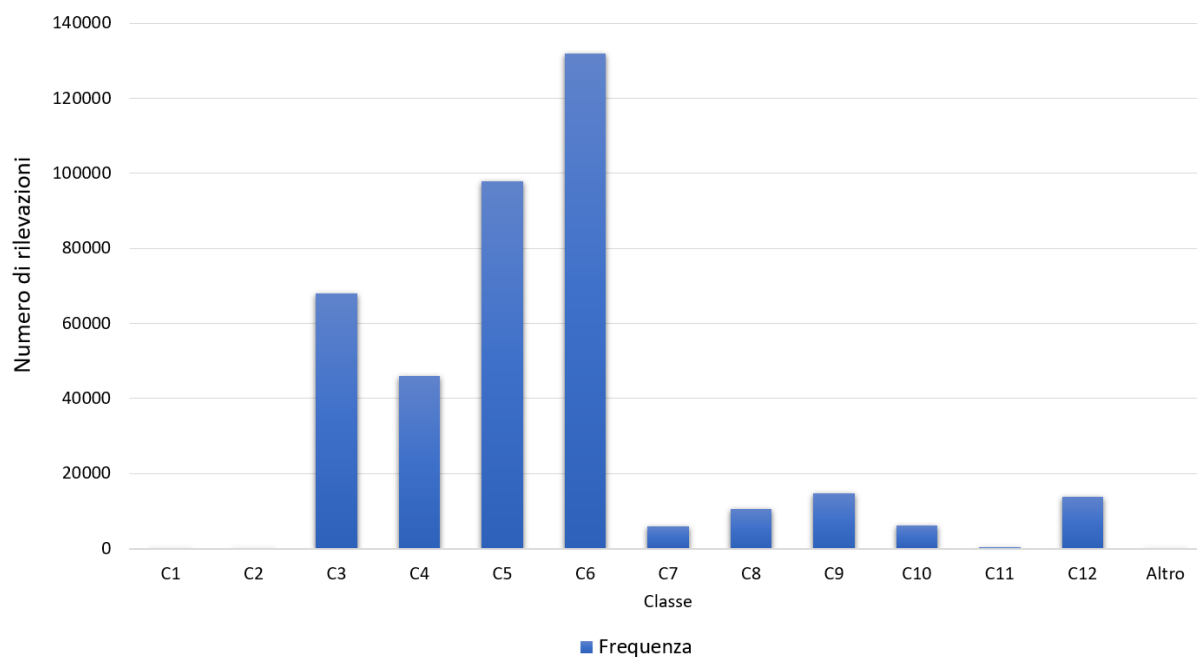


Figura 3.39: Istogramma delle potenze erogate dai gantries lungo l'asse x nello scenario 3

In ultima analisi, per ogni scenario produttivo, è stato generato un istogramma che descrive, per ogni stazione di lavoro, qual è il consumo di energia dovuto ai diversi stati attraversati dalla stazione stessa durante l'esecuzione della simulazione. I dati raccolti per realizzare gli istogrammi sono sempre riferiti ad un periodo di simulazione di nove giorni (dieci giorni di esecuzione con un giorno di warm-up).

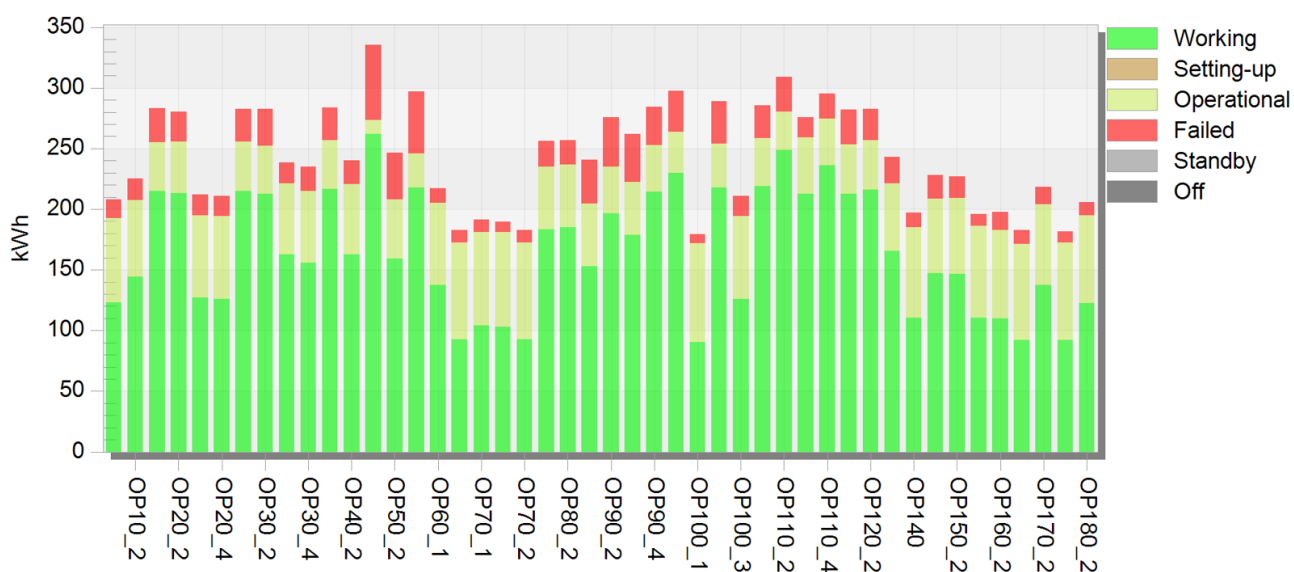


Figura 3.40: Consumi energetici delle stazioni di lavoro nello scenario 1

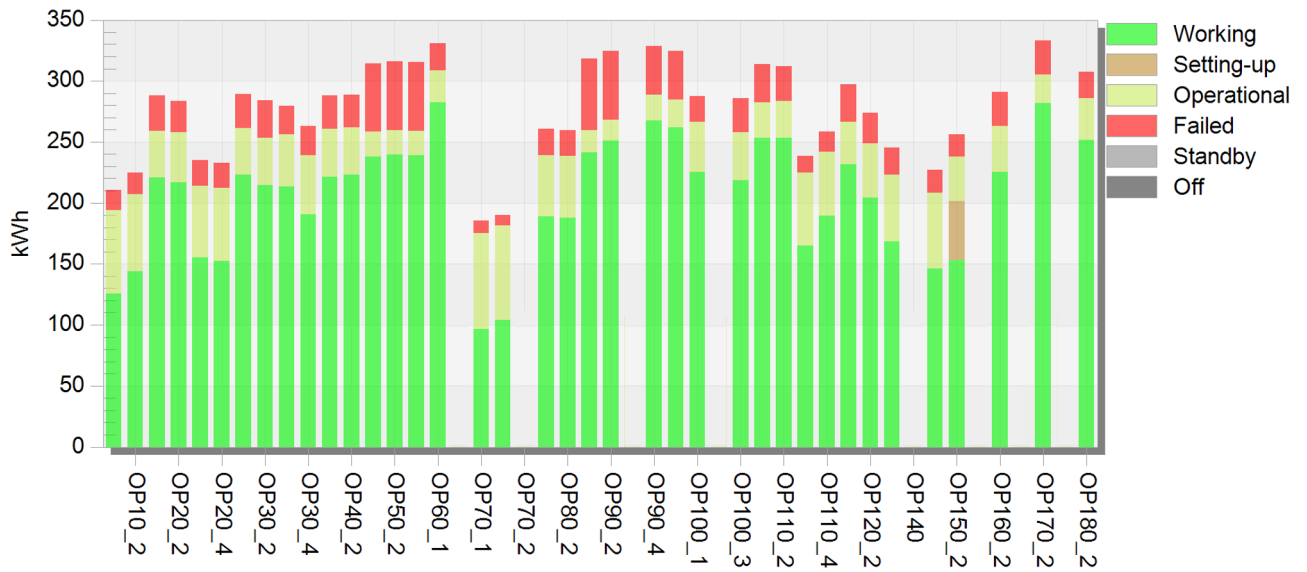


Figura 3.41: Consumi energetici delle stazioni di lavoro nello scenario 2

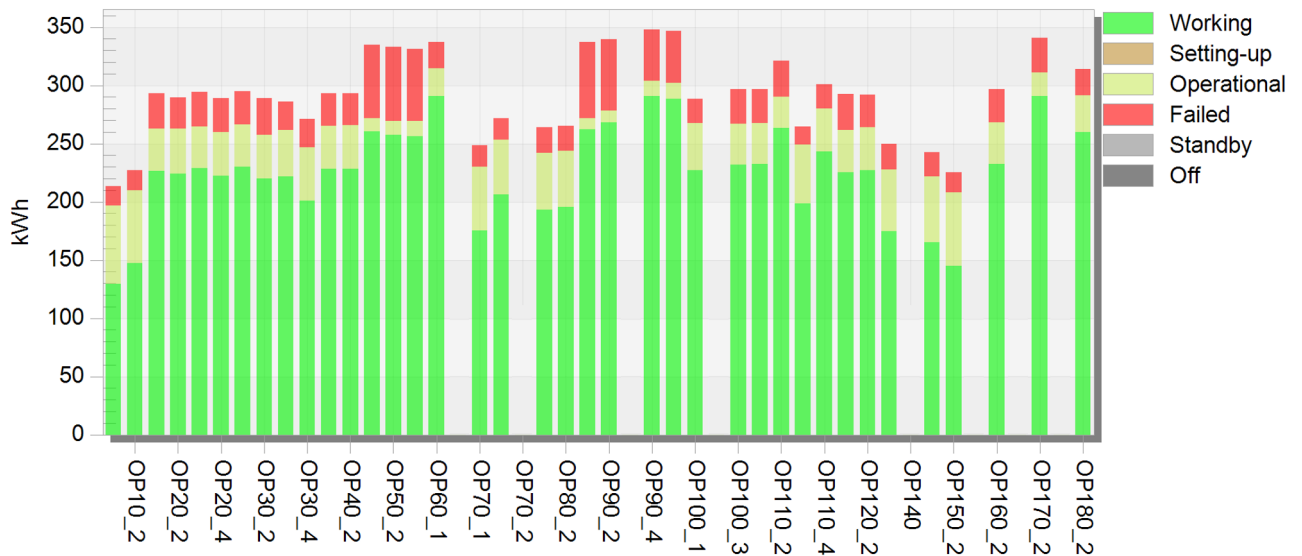


Figura 3.42: Consumi energetici delle stazioni di lavoro nello scenario 3

Da questi istogrammi si può facilmente notare come una rilevante parte di energia non costituisce un valore aggiunto per il processo produttivo, ma viene persa durante le attese (colore giallo), dovute ad un mancato carico o ad un blocco allo scarico, durante i guasti (colore rosso) e durante il tempo di setup dei macchinari (colore marrone). La scelta di dividere i due tipi di alberi motore, prodotti in un determinato scenario, su due flussi produttivi, ha come scopo proprio quello di ridurre al minimo le perdite dovute ai tempi di set-up. Infatti, nei grafici si evidenzia come le perdite

energetiche dovute al setup sono quasi nulle: se ne registra una sola presenza nello scenario 2 in corrispondenza della stazione OP150_2.

Grazie all'Energy Analyzer e ai grafici soprastanti, l'impresa, di cui è stato analizzato il processo produttivo, avrà la possibilità di confrontare i consumi energetici dei macchinari relativi a differenti scenari simulati. L'analisi, che in questa tesi è limitata ai tre scenari considerati, può essere estesa ad infinite configurazioni produttive, semplicemente modificando il mix produttivo in input alla sorgente. Ciò potrà essere effettuato dall'azienda stessa, attraverso un'interfaccia che prevede dei *menu a tendina* in cui possono essere impostate le percentuali che si intende produrre sui due flussi per ogni tipologia di albero motore.

3.9 Considerazioni economiche sull'analisi energetica

Nel Capitolo 1 è stato illustrato come le imprese, nel momento in cui devono prendere una decisione su un investimento, si basano sui costi relativi all'intero ciclo di vita dell'oggetto dell'investimento. Tra tutti i costi contemplati, un ruolo cruciale viene svolto dal consumo energetico, che incide non solo sui costi operativi ma anche sui costi di manutenzione dell'impianto.

In tal senso, una stima di quale sarà il consumo energetico dell'impianto e un dimensionamento della potenza necessaria ad alimentarlo, possono essere dei dati molto utili per eseguire una stima più precisa e affidabile del Life Cycle Cost.

Nel Paragrafo 3.8, sono stati quantificati i consumi energetici relativi alla potenza meccanica utile in uscita dai motori elettrici. Tuttavia, conoscendo il rendimento del motore elettrico, è possibile risalire alla potenza elettrica in input effettivamente assorbita dalla rete.

Dunque, partendo dalla stima del consumo energetico orario, ottenuto grazie alla simulazione, è stato possibile calcolare il consumo energetico annuale e moltiplicarlo per il rendimento del motore elettrico. Il motore elettrico, infatti, trasforma l'energia elettrica in ingresso in energia meccanica in uscita. Ciò implica delle perdite che definiscono tale rendimento, dato, appunto, dal rapporto tra la potenza in uscita e la potenza in ingresso. Per semplificare la procedura di calcolo, in accordo con l'azienda, è stato ipotizzato che tutti i motori presenti nell'impianto abbiano lo stesso rendimento, il quale è assunto pari all'80%. Tale stima è stata effettuata a partire dai dati storici presenti nei *database* della Sim.Tec.

Una volta ottenuto il consumo energetico annuale per ognuno dei tre scenari, si può stimare il costo annuale dovuto all'energia elettrica prelevata dalla rete. Per far

ciò è necessario conoscere il costo unitario di un kWh. L'Autorità di Regolazione per Energia Reti e Ambiente (ARERA) nella sua Relazione Annuale [55] indica quali sono i prezzi finali dell'energia elettrica riferiti all'anno precedente alla stesura della relazione stessa. Tali prezzi costituiscono una media dei prezzi dei Paesi appartenenti all'Unione Europea e sono illustrati, al netto e al lordo delle imposte, nella tabella in Figura 3.43. Nel caso in esame il consumo relativo al processo produttivo è inferiore ai 500 MWh per tutti e tre gli scenari. Comprendendo, poi, nell'impiego di energia elettrica altre fonti di consumo, come quella relativa all'illuminazione dell'impianto, la fascia di consumo da considerare potrebbe essere quella compresa tra 500 e 2000 MWh. Tuttavia, volendo essere conservativi nel calcolo della spesa energetica, è stato considerato il costo energetico associato alla fascia di consumo compresa tra 20 e 500 MWh (Figura 3.43).

CONSUMATORI PER FASCIA DI CONSUMO ANNUO (MWh)											
< 20		20-500		500-2.000		2.000-20.000		20.000-70.000		70.000-150.000	
NETTI	LORDI	NETTI	LORDI	NETTI	LORDI	NETTI	LORDI	NETTI	LORDI	NETTI	LORDI
14,11	22,91	9,96	17,18	8,00	14,17	7,11	12,24	6,39	10,22	5,90	9,49

Figura 3.43: Prezzi finali dell'energia elettrica per i consumatori industriali (UE) nel 2017 [c€/kWh] [55]

Considerando, dunque, un costo lordo per l'energia pari a 0,1718 €/kWh, si può procedere al calcolo del costo energetico annuale, riportato in Tabella 3.12. Nel calcolo è stato considerato un giorno pari a 22,5 ore (tre turni da 7,5 ore ciascuno) ed un anno formato da 280 giorni.

Tabella 3.12: Costo annuale energetico

	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
Energia Utile Annuale (MWh)	340,355	315,801	338,770
Consumo Energia Annuale (MWh)	425,440	394,752	423,462
Costo Energia Annuale (€)	73.091,19	67.818,36	72.750,78

Come si può notare, il secondo scenario è quello meno dispendioso dal punto di vista dei costi energetici, mentre il primo e il terzo sono quelli caratterizzati dal maggior costo.

In ogni caso, la volontà dell'azienda oggetto di studio è quella di implementare, nell'anno 2020, tutti e tre gli scenari produttivi. La sequenza ordinata di implementazione sarà la seguente:

- 75 giorni → Scenario 1
- 110 giorni → Scenario 2
- 95 giorni → Scenario 3

Secondo questo scenario produttivo annuale, il consumo energetico risultante sarebbe pari a 412,71 MWh ed il relativo costo uguale a 70.904,23 Euro.

L'analisi effettuata ha consentito di prevedere quale sarà il consumo dell'impianto in termini di energia elettrica e quale sarà la produzione che si realizzerà con ogni configurazione. Quest'ultimo dato di output non verrà discusso in questa tesi, in quanto, come già detto, costituisce un dato sensibile aziendale che contribuisce alla scelta di implementazione dei diversi scenari.

In ogni caso, l'obiettivo ultimo della tesi è quello di fornire all'azienda uno strumento e una metodologia che gli permetta di diventare autonoma nelle decisioni. Infatti, attraverso un'interfaccia, di cui si è già parlato alla fine del Paragrafo 3.8, essa avrà la possibilità di modificare diversi parametri del modello, come il mix produttivo.

I parametri modificabili di volta in volta, all'interno del modello, sono proprio tutte quelle variabili indipendenti elencate nella Tabella 3.8 del Paragrafo 3.7, a cui si deve aggiungere il costo unitario di energia elettrica. Infatti, una stima sempre più precisa di quest'ultimo parametro consente una rappresentazione più affidabile della spesa energetica annuale. Una volta stabiliti i valori delle diverse variabili, l'azienda può eseguire un *run* di simulazione e visualizzare i dati di output associati, tra cui i grafici mostrati nel Paragrafo 3.8.

È importante sottolineare come la metodologia utilizzata, a partire da equazioni dettate da leggi fisiche e da dati riguardanti i motori elettrici dei diversi macchinari, permette anche un dimensionamento della potenza elettrica necessaria all'impianto. Ciò consente la definizione della capacità di un eventuale sistema di accumulo, utile nel caso in cui l'impresa volesse dotarsi di un impianto ad energie rinnovabili, che, per loro natura, sono intermittenti. Infatti, esse sono legate, ad esempio, alla presenza di vento (nel caso di un impianto eolico) o alla presenza di radiazione solare (nel caso di un impianto fotovoltaico). La discontinuità di tali fonti, quindi, rende necessario un sistema di accumulo che permetta di immagazzinare l'energia elettrica prodotta

in eccesso quando c'è una grande disponibilità di fonti rinnovabili. Tale energia immagazzinata potrà, poi, essere utilizzata nel momento del bisogno quando tali fonti vengono meno.

Dunque, la possibilità di poter dimensionare in pochi minuti il carico elettrico del sistema di produzione per qualsiasi scenario produttivo, costituisce un grande incentivo alla realizzazione di un impianto di generazione elettrica da fonti rinnovabili.

Inoltre, nel momento in cui si conosce il consumo energetico del sistema in funzione del tempo (profilo di carico orario), derivante dalla simulazione, è possibile rilevare con rapidità qualsiasi anomalia nel sistema reale che si discosti dai valori simulati. Ciò consente di avere un maggiore controllo sul sistema stesso, compiendo un primo passo verso un Sistema di Gestione dell'Energia.

Capitolo 4

Conclusioni

La tesi, grazie allo studio di una linea di lavorazione di alberi motore, ha mostrato come, attraverso la simulazione, sia possibile studiare gli aspetti energetici di un impianto produttivo, quantificandone i consumi e il costo. Il Digital Twin realizzato costituisce un vero e proprio strumento “predittivo” del sistema in esame, poiché consente di valutare nuove soluzioni tecniche e nuovi scenari produttivi, prima della loro effettiva implementazione nella realtà.

Di seguito sono evidenziati i benefici apportati all’azienda, i limiti e gli sviluppi futuri del progetto.

4.1 Benefici portati all’azienda dalla tesi

Come già descritto alla fine del Capitolo 3, la tesi apporta un grande valore aggiunto all’impresa studiata, dal momento in cui fornisce una metodologia che può essere utilizzata per il dimensionamento energetico e produttivo di diverse configurazioni della linea di lavorazione esaminata. Il grande pregio dell’utilizzo della simulazione è quello di non limitarsi ad un mero calcolo statico, ma di eseguire un’analisi dinamica del processo: ciò ha consentito di tener conto di tutte le interazioni tra gli oggetti presenti nell’impianto, identificando i collegamenti causa-effetto e gli algoritmi ottimali di movimentazione. Inoltre, grazie a tale strumento di analisi, è stato possibile sviluppare diverse alternative produttive, senza alcun rischio connesso alla sperimentazione in campo e alla messa in funzione reale della linea di produzione oggetto di studio. Per di più, la simulazione ha consentito di individuare in modo immediato la presenza di errori o, in generale, di vincoli che causano mal funzionamenti nel sistema.

È importante sottolineare che i vantaggi offerti dalla simulazione hanno un costo solitamente inferiore all’1% dell’investimento necessario per l’effettiva realizzazione

delle modifiche tecniche o, in generale, dell'impianto studiato [56].

Oltre ai benefici naturalmente apportati all'impresa esaminata, un grande valore aggiunto è stato generato anche per la SimTec, in quanto ha approfondito e sviluppato nuove capacità nell'applicazione della simulazione al campo energetico. Il tempo impiegato per comprendere il funzionamento di uno strumento di libreria di Plant Simulation oppure per sviluppare una determinata metodologia (e creare, quindi, nuovi oggetti di libreria specifici non esistenti nel software), fa sicuramente aumentare il time-to-market dei progetti, ma, nello stesso tempo, incrementa la crescita dell'impresa nel lungo periodo.

La tesi ha sviluppato una metodologia, per analizzare i consumi energetici, che va oltre il semplice utilizzo dello strumento Energy Analyzer, fornito dal software di simulazione. Ad esempio, la creazione dell'oggetto di libreria "Gantry" apporta un grande beneficio all'azienda, poichè esso può essere utilizzato per ogni altro progetto che prevede un oggetto di movimentazione uguale o simile al gantry. Inoltre, le logiche basate sulle equazioni di calcolo dei relativi consumi energetici, possono essere applicate a qualsiasi altro macchinario di movimentazione, a patto che siano disponibili i dati di input necessari.

Come descritto nel primo capitolo, fattori come il riscaldamento globale, l'esaurimento delle fonti fossili e l'aumento dei prezzi dell'energia, fanno sì che il settore manifatturiero si concentri sempre più sulla ricerca di strategie e tecnologie che consentano di migliorare l'efficienza energetica, ottimizzando l'uso di tale energia e, di conseguenza, riducendone i costi. L'industria manifatturiera, infatti, è responsabile del 50% dell'energia consumata dal settore industriale, che corrisponde al 30% dell'energia elettrica prodotta in tutto il mondo [19].

In questo scenario, è sempre più importante per le imprese manifatturiere acquisire strumenti che consentano il monitoraggio e il controllo dei consumi energetici. Dunque, la possibilità di offrire uno strumento come la simulazione, con la creazione di un Digital Twin specifico per la definizione dei profili energetici, dà a SimTec un grande valore aggiunto.

Il valore è tanto più grande quanto più è flessibile il modello di simulazione, cioè quanti più scenari è possibile rappresentare con esso. In questo caso, come richiesto dall'azienda oggetto di studio, la flessibilità riguarda soprattutto la possibilità di rappresentare diversi mix produttivi, in modo che essa, con la simulazione in mano, possa effettuare, di volta in volta, vari test, necessari per comprendere la produzione e il consumo energetico di ogni scenario.

Il vantaggio del Digital Twin consiste proprio nella possibilità di effettuare un'a-

nalisi previsionale delle varie configurazioni dell'impianto, tenendo sotto stretto controllo, non solo l'aspetto energetico, ma una molteplicità di variabili, che giocano un ruolo attivo nei processi decisionali.

4.2 Limitazioni della tesi

L'intento di rappresentazione dei consumi energetici del sistema in esame, è stato soggetto a diversi limiti.

Innanzitutto, è già stato evidenziato come i parametri che possono variare da una configurazione all'altra sono limitati. Ad esempio, l'azienda in esame non ha la possibilità di modificare la disposizione delle risorse all'interno del modello o aggiungerne altre, per aumentare la produzione, lì dove sorgono dei colli di bottiglia. Per questa tipologia di modifiche, che richiedono un cambiamento del layout del sistema, è necessario, infatti, ricorrere alla creazione di una nuova versione del Digital Twin.

Dunque, sebbene questo sia un limite di flessibilità del modello, esso può essere facilmente superato con la costruzione di un altro Digital Twin, il cui tempo di realizzazione sarebbe molto inferiore rispetto a quello del presente modello. Ciò è dovuto al fatto che potrebbero essere riutilizzate tutte le logiche implementate nel modello attuale.

Il limite principale della tesi è sicuramente l'impossibilità di un confronto dei risultati ottenuti con dati reali dell'impianto in questione. Come già evidenziato, infatti, l'impianto sarà oggetto di un *retooling*, dunque i dati effettivamente disponibili sono relativi ad una diversa configurazione e non completamente compatibili con il Digital Twin creato. Per questo motivo, come già illustrato, in ogni step della costruzione del modello, si è lavorato a stretto contatto con gli esperti in materia dell'impianto, per verificare la coerenza dei risultati ottenuti.

Per quanto riguarda il calcolo dei consumi energetici di macchinari e sistemi di movimentazione, non si è potuto disporre di dati rilevati tramite smart meters ad essi applicati, ma si è ricorso a database di dati della SimTec e all'utilizzo di equazioni date dal comportamento fisico degli oggetti nel sistema.

Inoltre, l'Energy Analyzer prende in considerazione gli aspetti energetici in modo limitato. Infatti il consumo energetico viene determinato indicando il carico medio per i differenti stati operativi dei macchinari. Tuttavia, poiché nella realtà il carico medio di un macchinario oscilla, soprattutto in presenza di tempi di processo più lunghi, l'uso di valori medi rappresenta una semplificazione [38]. Per di più, con tale

metodo, non vengono presi in considerazione i picchi di potenza che si generano nei momenti di avvio e di spegnimento dei macchinari.

Al fine di tener conto degli interi profili di carico dei macchinari e ridurre, quindi, il grado di incertezza dei risultati, sarebbe necessario disporre di molti più dati, rilevati da sensori. Purtroppo, a causa della mancanza di un Sistema di Gestione dell'Energia nell'impianto attualmente esistente (as-is), i profili di carico non possono essere rilevati durante il funzionamento dell'impianto stesso.

4.3 Passi futuri

L'obiettivo ultimo della creazione del Digital Twin consiste nella realizzazione, in ambiente reale, del modello virtuale e di tutte le logiche sperimentate.

Per superare i limiti discussi nel Paragrafo 4.2 e per validare definitivamente il modello e il calcolo dei consumi energetici, sarà necessario applicare dei sensori ai vari macchinari e sistemi di trasporto presenti nell'impianto reale, in modo che rilevino, in maniera più puntuale, i valori delle variabili di input utilizzate nel modello. I segnali provenienti dai sensori possono essere elaborati grazie al Programmable Logic Controller (PLC) e inseriti, quindi, nel Digital Twin. Infine, gli output reali potranno essere confrontati con quelli ottenuti attraverso la simulazione, per verificarne l'esattezza.

È importante sottolineare come l'utilità del Digital Twin va oltre la semplice identificazione delle caratteristiche energetiche e tecniche dei diversi scenari produttivi in fase di progettazione preliminare. Infatti, una simulazione energetica continua, durante il funzionamento dell'impianto, costituisce sicuramente un'ottima base decisionale per reagire con immediatezza ad eventi imprevisti, come interruzioni della produzione o variazioni del prezzo di mercato dell'elettricità. Aggiornando in modo continuo i dati di input della simulazione, attraverso il collegamento del Digital Twin all'impianto reale, sarà possibile tenere sotto controllo il profilo energetico dell'intero sistema. L'acquisizione automatizzata di dati energetici, infatti, fornisce una maggiore consapevolezza in termini di efficienza energetica dell'impianto e apre la strada a diverse applicazioni dell'Industria 4.0, come l'utilizzo di dispositivi in grado di regolare in tempo reale determinati parametri di input o la "profilazione energetica intelligente". Quest'ultima consiste nel monitorare i profili dei macchinari, in modo da gestire in anticipo le diverse richieste di consumo e livellare i picchi di energia, riducendo il carico dove e quando necessario.

In questo senso, il Digital Twin potrà essere utilizzato nella quotidianità dello stabilimento, trasformandosi in un vero e proprio software di gestione operativa.

Bibliografia

- [1] O'Dwyer E., Pan I., Acha S., and Shah N. (2019). "Smart energy systems for sustainable smart cities: Current developments, trends and future directions". *Applied Energy*, Vol. 237, pp. 581-597.
- [2] International Energy Agency (2019). World energy investment 2019. *IEA Annual Report*, <https://www.iea.org/wei2019/> (ultimo accesso il 19 settembre 2019).
- [3] Carpentieri M., Guglielmini A.N.Jr, and Mangione F. (2007). "A life cycle cost framework for the management of spare parts". In *Takata S., Umeda Y. (eds) Advances in Life Cycle Engineering for Sustainable Manufacturing Businesses*, Springer, London.
- [4] Bosonaa T., Gebresenbet G., and Dyjakon A. (2019). "Implementing life cycle cost analysis methodology for evaluating agricultural pruning-to-energy initiatives". *Bioresource Technology Reports*, Vol. 6, pp. 54-62.
- [5] Elmakis D. and Lisnianski A. (2006). "Life cycle cost analysis: Actual problem in industrial management". *Journal of Business Economics and Management*, Vol. 7, pp. 5-8.
- [6] Kianian B., Kurdve M., and Andersson C. (2019). "Comparing life cycle costing and performance part costing in assessing acquisition and operational cost of new manufacturing technologies". *Procedia CIRP*, Vol. 80, pp. 428-433.
- [7] Tosatti L.M. (2006). "Life cycle cost calculation for investment decision in manufacturing". *Institute of Industrial Technology and Automation – National Research Council*, Milano, Italy.
- [8] Huang J., Chang Q., Arinez J., and Xiao G. (2019). "A maintenance and energy saving joint control scheme for sustainable manufacturing systems". *Procedia CIRP*, Vol. 80, pp. 263-268.

- [9] Zhou P. and Yin P.T. (2019). “An opportunistic condition-based maintenance strategy for offshore wind farm based on predictive analytics”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 109, pp. 1-9.
- [10] International Energy Agency (2014). *Capturing the Multiple Benefits of Energy Efficiency*. <https://webstore.iea.org/capturing-the-multiple-benefits-of-energy-efficiency> (ultimo accesso il 19 settembre 2019).
- [11] International Energy Agency (2018). Market report series: Energy efficiency 2018. *IEA Annual Report*, <https://webstore.iea.org/market-report-series-energy-efficiency-2018> (ultimo accesso il 19 settembre 2019).
- [12] Cullen J.M., Allowood J.M., and Bambach M.D. (2012). “Mapping the global flow of steel: From steel-making to end-use goods”. *Environmental Science and Technology*, Vol. 46, pp. 13048-55.
- [13] Wang Q. and Yuan B. (2018). “Air pollution control intensity and ecological total-factor energy efficiency: The moderating effect of ownership structure”. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 186, pp. 373-387.
- [14] De la Rue du Can S., Pudleiner D., and Pielli K. (2018). “Energy efficiency as a means to expand energy access: A uganda roadmap”. *Energy Policy*, Vol. 120, pp. 354-364.
- [15] United Nations. Decision 1/CP.21: Adoption of the Paris Agreement. *Framework Convention on Climate Change*, 2015.
- [16] Patterson M.G. (1996). “What is energy efficiency?: Concepts, indicators and methodological issues”. *Energy Policy*, Vol. 24, pp. 377-390.
- [17] Tuo J., Liu F., Liu P., Zhang H., and Cai W. (2018). “Energy efficiency evaluation for machining systems through virtual part”. *Energy*, Vol. 159, pp. 172-183.
- [18] Corrado V. and Fabrizio E. (2014). *Fondamenti di Termofisica dell’Edificio e Climatizzazione*. Clut, Torino, Italy.
- [19] Diaz J.L., Bermeo M., Diaz-Rozo J., and Ocampo-Martinez C. (2019). “An optimization-based control strategy for energy efficiency of discrete manufacturing systems”. *ISA Transactions*, <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2019.03.015> (ultimo accesso il 19 settembre 2019).

- [20] Zhang Z., Tang R., Peng T., Tao L., and Jia S. (2016). “A method for minimizing the energy consumption of machining system: integration of process planning and scheduling”. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 137, pp. 1647-1662.
- [21] Cai W., Liu F., Xie J., Liu P., and Tuo J. (2017). “A tool for assessing the energy demand and efficiency of machining systems: Energy benchmarking”. *Energy*, Vol. 138, pp. 332-347.
- [22] Yang Y., Zhihong Z., and Shanshan W. (2019). “Statistical regression modeling for energy consumption in wastewater treatment”. *Journal of Environmental Sciences*, Vol. 75, pp. 201-208.
- [23] Khan Z.A., Jayaweera D., and Manuel Alvarez-Alvarado, S. (2018). “A novel approach for load profiling in smart power grids using smart meter data”. *Electric Power Systems Research*, Vol. 165, pp. 191-198.
- [24] Law A.M. and Kelton W.D. (2000). *Simulation Modeling and Analysis*. McGraw-Hill.
- [25] Paulista C.R., Peixoto T.A., and de Assis Rangel J.J. (2019). “Modeling and discrete event simulation in industrial systems considering consumption and electrical energy generation”. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 224, pp. 864-880.
- [26] Liker J.K. (2004). *The Toyota Way: 14 Management Principles from the World's Greatest Manufacturer*. McGraw-Hill, New York.
- [27] Jia S., Yuan Q., Lv J., Liu Y., Ren D., and Zhang Z. (2017). “Therblig-embedded value stream mapping method for lean energy machining”. *Energy*, Vol. 138, pp. 1081-1098.
- [28] Verma N. and Sharma V. (2017). “Energy value stream mapping a tool to develop green manufacturing”. *Procedia Engineering*, Vol. 149, pp. 526-534.
- [29] Asan U., Kayakutlu G., and Keskin C. (2013). “Value stream maps for industrial energy efficiency”. *Green Energy and Technology*, Vol. 129, pp. 357-379.
- [30] Baysan S., Kabadurmus O., Cevikcan E., Satoglu S.I., and Durmusoglu M.B. (2019). “A simulation-based methodology for the analysis of the effect of lean tools on energy efficiency: An application in power distribution industry”. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 211, pp. 895-908.

- [31] Kohl J., Spreng S., and Franke J. (2014). “Discrete event simulation of individual energy consumption for product-varieties”. *Procedia CIRP*, Vol. 17, pp. 517-522.
- [32] Sobottka T., Kamhuber F., Rössler M., and Sihm W. (2018). “Hybrid simulation-based optimization of discrete parts manufacturing to increase energy efficiency and productivity”. *Procedia Manufacturing*, Vol. 21, pp. 413-420.
- [33] Moritz G., G. Kasakow, and Aurich J.C. (2018). “Combining physical simulation and discrete-event material flow simulation”. *Procedia CIRP*, Vol. 72, pp. 420-425.
- [34] Antonelli D., Litwin P., and Stadnicka D. (2018). “Multiple system dynamics and discrete event simulation for manufacturing system performance evaluation”. *Procedia CIRP*, Vol. 78, pp. 178-183.
- [35] Piccinini A., Previdi F., Cimini C., Pinto R., and Pirola F. (2018). “Discrete event simulation for the reconfiguration of a flexible manufacturing plant”. *IFAC PapersOnLine*, 51(11), pp. 465-470.
- [36] Kasakow G., Menck N., and Aurich J.C. (2016). “Event-driven production planning and control based on individual customer orders”. *Procedia CIRP*, Vol. 57, pp. 434-438.
- [37] Barrera-Diaz C.A., Oscarsson J., Lidberg S., and Sellgren T. (2018). “Discrete event simulation output data-handling system in an automotive manufacturing plant”. *Procedia Manufacturing*, Vol. 25, pp. 23-30.
- [38] Mayr A., Lechler T., Donhauser T., Metzner M., Schäffer E., Fischer E., and Franke J. (2019). “Advances in energy-related plant simulation by considering load and temperature profiles in discrete event simulation”. *Procedia CIRP*, Vol. 81, pp. 1325-1330.
- [39] Thiede S., Bogdanski G., and Herrmann C. (2012). “A systematic method for increasing the energy and resource efficiency in manufacturing companies”. *Procedia CIRP*, Vol. 2, pp. 28-33.
- [40] Schönemann M., Schmidt C., Herrmann C., and Thiede S. (2012). “Multi-level modeling and simulation of manufacturing systems for lightweight automotive components”. *Procedia CIRP*, Vol. 41, pp. 1049-1054.

- [41] Mrugalska B. and Wyrwicka M.K. (2017). “Towards lean production in industry 4.0”. *Procedia Engineering*, Vol. 182, pp. 466-473.
- [42] Mayr A., Weigelt M., Kühl A., Grimm S., Erll A., Potzel M., and Franke J. (2018). “Lean 4.0 - a conceptual conjunction of lean management and industry 4.0”. *Procedia CIRP*, Vol. 72, pp. 622-628.
- [43] Tomiyama T., Lutters E., Stark R., and Abramovici M. (2019). “Development capabilities for smart products”. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 68, pp. 727-750.
- [44] Boschi F., De Carolis A., and Taisch M. (2017). Nel cuore dell’industria 4.0: i cyber-physical systems. *Industria Italiana*, <https://www.industriaitaliana.it/nel-cuore-dell-industry-4-0-i-cyber-physical-systems/> (ultimo accesso il 7 settembre 2019).
- [45] The Industrial Internet Consortium (2014). “A global nonprofit partnership of industry, government and academia”. <http://www.iiconsortium.org/about-us.htm> (ultimo accesso il 7 settembre 2019).
- [46] Kagermann H., Wahlster W., and Helbig J. (2013). “Recommendations for implementing the strategic initiative industrie 4.0”. *Acatech - National Academy of Science and Engineering*, <https://www.din.de/blob/76902/e8cac883f42bf28536e7e8165993f1fd/recommendations-for-implementing-industry-4-0-data.pdf> (ultimo accesso il 7 settembre 2019).
- [47] Kikolski M. (2017). “Study of production scenarios with the use of simulation models”. *Procedia Engineering*, Vol. 182, pp. 321-328.
- [48] Krause H.M. (2019). “Il digital twin entra in fabbrica”. *Industrie 40*, Anno III, N. 1, pp. 50-53.
- [49] Schmidt J.W. and Taylor R.E. (1970). *Simulation and Analysis of Industrial Systems*. Richard D. Irwin, Homewood, Illinois.
- [50] Wiendahl H. (2005). “Some remarks on changeability, reconfigurability and flexibility of manufacturing systems”. A Panel Discussion, 3rd Conference on Reconfigurable Manufacturing, Ann Arbor, Michigan, USA.
- [51] Garwood T.L., Hughes B.R., Oates M.R., O’Connor D., and Hughes R. (2018). “A review of energy simulation tools for the manufacturing sector”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 81, pp. 895-911.

- [52] Bangsow S. (2010). *Manufacturing Simulation with Plant Simulation and SimTalk*. Springer.
- [53] Gadaleta M., Pellicciari M., and Berselli G. (2019). “Optimization of the energy consumption of industrial robots for automatic code generation”. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 57, pp. 452-464.
- [54] Sinaga N., Paryanto P., Widyanto S.A., Rusnaldy R., Hetzner A., and Franke J. (2018). “An analysis of the effect of gravitational load on the energy consumption of industrial robots”. *Procedia CIRP*, Vol. 78, pp. 8-12.
- [55] ARERA (2019). *Relazione Annuale. Stato dei servizi*, volume 1, pp. 46.
- [56] Bucci P., Pasotti A., and Vinati S. (2019). “Virtual commissioning e l’innovazione decolla”. *Automazione Industriale*, Vol. 273, pp. 58-61.