



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI UDINE

Dottorato di ricerca in Tecnologie Chimiche ed Energetiche

Ciclo XXVI

*Progettazione energeticamente efficiente
degli Automated Storage and Retrieval Systems*

Luca Monti

COMMISSIONE

Prof. Diego D'URSO
Prof.ssa Valeria MININNO
Prof. Sergio CAVALIERI
Prof. Giulio LORENZINI
Prof. Piero PINAMONTI
Prof.ssa Antonella MENEGHETTI

Revisore
Revisore
Commissario
Commissario
Commissario
Supervisore

Prof. Alfredo SOLDATI

Coordinatore del dottorato

Author's e-mail luca.monti@uniud.i
 Ing.monti_luca@yahoo.it

Author's address:

Dipartimento di Ingegneria Elettrica
Gestionale e Meccanica
Università degli studi di Udine
Via delle Scienze,106
33100 Udine -Italia
web <http://www.diegm.uniud.it>

Indice

1	Introduzione	1
1.1	Contesto della ricerca	1
1.2	Oggetto della tesi	3
1.2.1	Componenti degli AS/RS	4
1.2.2	Tipologie di AS/RS	8
1.2.3	La progettazione di un sistema AS/RS	11
1.2.4	Politiche di controllo	14
1.3	Obiettivi e articolazione della tesi	15
2	Modelli di tempo ed energia	19
2.1	Ipotesi preliminari	19
2.2	Profili di velocità e calcolo dei tempi di viaggio	20
2.3	Il modello per il calcolo dell'energia	24
2.4	Esempio di calcolo del consumo energetico	27
2.5	Il Rack Energy Potential	30
3	Politiche di storage assignment	33
3.1	Time-based storage location assignment: review della lettera- tura	34
3.2	Ipotesi preliminari	36
3.3	Energy-based full turnover policy	37
3.3.1	Distribuzione e forma delle zone dedicate ai prodotti	39
3.3.2	Analisi delle prestazioni	40
3.4	L'impatto del recupero energetico	43
3.4.1	Allocazione condivisa	44
3.4.2	Forma delle zone dedicate ai prodotti	45
3.4.3	Prestazioni delle politiche di stoccaggio dedicate	46
3.5	Sistemi con unità di carico a peso multiplo	49
3.5.1	Effetto dei pesi multipli sulle zone dedicate ai prodotti	50

3.5.2	Effetto delle politiche di allocazione sul consumo energetico	52
3.6	Politiche di allocazione dinamica	57
3.7	Conclusioni	59
4	Politiche di dwell point	61
4.1	Introduzione	61
4.2	Review della letteratura	62
4.3	Identificazione delle locazioni di dwell point	64
4.4	Esperimenti simulativi	66
4.5	Risultati	68
4.6	Conclusioni	70
5	Politiche di sequencing	71
5.1	Introduzione	71
5.2	Review della letteratura	74
5.3	Euristica greedy per l'ottimizzazione dei cicli combinati in ottica energy based	75
5.4	Ottimizzazione delle operazioni di stoccaggio e di prelievo	77
5.4.1	Constraint Programming	77
5.4.2	Il modello	78
5.4.3	Risoluzione del problema con Constraint Programming e Large Neighborhood Search	81
5.5	Esperimenti simulativi	84
5.5.1	Confronto tra cicli singoli e doppi	86
5.5.2	Analisi fattoriale	88
5.6	Conclusioni	91
6	Ottimizzazione sostenibile della configurazione di sistema	93
6.1	Introduzione	93
6.2	Review della letteratura	94
6.3	Un nuovo approccio all'ottimizzazione della progettazione	96
6.3.1	Principali problematiche e variabili decisionali della seconda fase di progettazione	97
6.3.2	La funzione obiettivo nella prospettiva economica	101
6.3.3	La funzione obiettivo nella prospettiva ambientale	104
6.3.4	Vincoli del modello	106
6.4	Risultati	109
6.4.1	Il caso studio	109
6.4.2	Soluzione ottima del modello economico	111
6.4.3	Soluzione ottima del modello ambientale	116
6.5	Conclusioni	120

7	Configurazione degli AS/RS refrigerati	125
7.1	Gli AS/RS e le cold chain	125
7.2	Il modello di ottimizzazione per R-AS/RS sostenibili	127
7.2.1	Energy models	128
7.2.2	La funzione obiettivo	130
7.2.3	Constraints	137
7.3	Risultati	140
7.3.1	Impatto delle variabili decisionali di supply chain	142
7.4	Conclusioni	146
8	Conclusioni	151

Elenco delle figure

1.1	Consumo energetico mondiale per settore (2012) (fonte Energy Information Administration 2012: www.eia.gov)	3
1.2	Principali componenti di un AS/RS (adattata da www.taiwandaifuku.com)	5
1.3	Elementi costitutivi delle scaffalature metalliche	6
1.4	Elementi costitutivi del trasloelevatore. Tratto da www.lcssrl.it	8
1.5	Satellite a servizio della scaffalatura a profondità multipla. Fonte: www.modulblok.com	10
1.6	Tipologie di AS/RS. (Adattato da Roodbergen and Vis (2009))	11
1.7	Problematiche della progettazione di un sistema AS/RS	13
1.8	Problematiche di design fisico e politiche di controllo affrontate in ottica sostenibile e relativa articolazione della tesi	17
2.1	Variazione del profilo di velocità per il moto più veloce necessario per completare lo spostamento nello stesso tempo di quello più lento (differenza di tempo Δt . In colore nero viene rappresentato il profilo di velocità originale (t_A, t_{CS}, v_{max}) , in colore grigio il nuovo profilo $(t'_A, t'_{CS}, v'_{max})$	21
2.2	Variazione del profilo di velocità per il moto più veloce necessario per completare lo spostamento nello stesso tempo di quello più lento. In colore nero viene rappresentato il profilo di velocità originale, in colore rosso il nuovo profilo ad accelerazione costante e in blu il nuovo profilo nel caso di variazione dei valori di accelerazione	22
2.3	Schema a blocchi per la determinazione del nuovo tempo di accelerazione/decelerazione t'_A , del tempo a velocità costante t'_{CS} e della velocità di regime v'_{max} per il moto più veloce.	23
2.4	Schema a blocchi per la determinazione dell'energia.	26
3.1	Andamento della curva di domanda ABC 20-50	38

3.2	Allocazione TBFT (a sinistra) e EBFT (a destra) per i 5 prodotti con tasso di turnover più alto. Rappresentazione delle prime 15 colonne e 10 ripiani della scaffalatura 22x45.	40
3.3	Effetti principali e di interazione dei fattori geometria della scaffalatura (S, da 10x99 a 22x45), distribuzione di domanda (C, da 20-50 a 20-80) e politica di allocazione (A, da TBFT a EBFT) per tempo (in blu) ed energia (in rosso).	42
3.4	Percentuale relativa di decremento del Rack Energy Potentials per differenti fattori di recupero energetico	45
3.5	Distribuzione delle zone dedicate ai primi 5 prodotti nella scaffalatura 22x45 con politica EBFT in assenza (sinistra) o presenza (destra) di recupero energetico	46
3.6	Distribuzione delle zone dedicate ai primi 5 prodotti nella scaffalatura 22x45 con politica EBFT e recupero energetico per u.d.c. di 1000 kg (sinistra) e 600 kg (destra)	46
3.7	Effetti principali e di interazione dei fattori geometria della scaffalatura(S, da 10x99 a 22x45), distribuzione di domanda (C, da 20-50 a 20-80) e politica di allocazione (A, da TBFT a EBFT) per tempo (in blu) ed energia (in rosso).	48
3.8	Time-based full turnover location assignment per i primi 8 prodotti a peso singolo (600 kg) per la curva di domanda 20-50. Rappresentazione delle prime 15 colonne e 12 ripiani della scaffalatura 22x45.	51
3.9	Energy-based full turnover location assignment per i primi 8 prodotti a peso singolo (600 kg) per la curva di domanda 20-50. Rappresentazione delle prime 15 colonne e 12 ripiani della scaffalatura 22x45.	51
3.10	Allocazione energy-based full turnover (scaffalatura 22x45 e curva di domanda 20-50) per i prodotti più leggeri (colore blu) e prodotti più pesanti (colore rosa).	52
3.11	Stratified energy-based location assignment per i primi 8 prodotti con pesi multipli. Rappresentazione delle prime 15 colonne della scaffalatura (scaffalatura 22x45 e curva 20-50).	53
3.12	Risparmio energetico percentuale ottenuto con le diverse politiche (per classi, stratificata, time-based full turnover, energy-based full turnover) rispetto all'allocazione casuale.	56
4.1	Percorso di prelievo nel caso di dwell point alla stazione di I/O (percorso in nero) e nel caso di dwell point al baricentro della scaffalatura G (percorso in rosso)	68
5.1	Distribuzione delle dimensioni dei blocchi nei cicli dual command per le curve ABC di domanda 20-50 (in azzurro) e 20-80 (in rosso).	86

5.2	Effetti principali e di interazione dei fattori geometria della scaffalatura (S, da 10×99 a 22×45), curva di domanda (C, da 20-50 a 20-80), obiettivo del sequenziamento (O, dalla minimizzazione del tempo a quella dell'energia) e politica di allocazione (A, da EBFT a BEOL), per le prestazioni di tempo (in azzurro) e di energia(in rosso)	89
6.1	Approccio globale alla progettazione; si adotta il Constraint Programming (CP) nella seconda fase di progettazione	98
6.2	Distribuzione dei costi totali annui per la configurazione ottima.	114
6.3	Distribuzione dei costi totali annui della miglior soluzione per ogni possibile combinazione di scaffalatura e politica di allocazione.	114
6.4	Distribuzione delle emissioni totali annue per la configurazione ottima.	117
6.5	Distribuzione delle emissioni totali annue della miglior soluzione per ogni possibile combinazione di scaffalatura e politica di allocazione.	119
7.1	Andamento delle temperature nei 24 periodi considerati per il caso studio	130
7.2	Struttura dei costi annui della soluzione ottima	143
7.3	Struttura del fabbisogno energetico per la soluzione ottima . .	143
7.4	Costi annuali per le soluzioni ottimali con specificato numero di livelli	144

Elenco delle tabelle

1.1	Principali specifiche dei trasloelevatori.	8
3.1	Specifiche dei trasloelevatori	38
3.2	Performance di tempo e di energia dell'allocazione time-based full turnover (TB) e dell'allocazione energy-based full turnover (EB)	41
3.3	Prestazioni realtive ad un'allocazione EBFT rispetto ad un'allocazione casuale	43
3.4	Rack Energy Potentials	44
3.5	Performance di tempo e di energia dell'allocazione time-based full turnover (TB) e dell'allocazione energy-based full turnover (EB)in presenza di recupero energetico	47
3.6	Variazioni percentuali di tempo e di energia nel passaggio dall'allocazione TBFT senza recupero energetico ad un'allocazione EBFT con recupero energetico	47
3.7	Rack energy potentials (REP) per differenti classi di peso. . .	54
3.8	Prestazioni di tempo ed energia per le politiche EBFT e best energy open location nelle modalità dynamic turnover-based e weight-based.	58
4.1	Variazione percentuale relativa spostando il dwell point dalla stazione di I/O al baricentro temporale della scaffalatura . . .	69
5.1	Variabili del modello	79
5.2	Dati di input per il modello: n rappresenta il numero di ciclo dual command all'interno di un blocco, P è il numero della classe del prodotto, L è la capacità di stoccaggio della scaffalatura	79
5.3	Tempo ed energia richiesta per operazione per la politica energy-based full turnover	87

5.4	Tempo ed energia richiesta per operazione per la best energy open location policy	88
6.1	Possibile configurazione degli strati a seconda delle diverse opzioni di scaffalatura e politica di allocazione.	110
6.2	Possibili configurazioni di baie a seconda delle diverse opzioni di scaffalatura e numero di posti pallet per baia.	110
6.3	Specifiche delle spalle: codice, massima capacità di carico, costo per unità di lunghezza, peso per unità di lunghezza, ingombro	111
6.4	Specifiche dei correnti: codice, posti-pallet, tipo spalla, massima capacità di carico, peso per coppia di corrente, altezza.	111
6.5	Principali specifiche dei trasloelevatori.	112
6.6	Consumo di energia per tipo di scaffalatura e politica di allocazione	112
6.7	Costi relativi alla soluzione ottimale: scaffalatura 10 × 99, stratified random storage policy e 3 posti-pallet per baia.	113
6.8	Risultati per sistemi con u.d.c. mono-peso.	116
6.9	Dati delle emissioni per la soluzione ottima: scaffalatura 10 × 99, stratified storage policy e 3 posti pallet per baia.	117
6.10	Emissioni per sistemi mono-peso	119
6.11	Variabili del modello	122
6.12	Parametri del modello: simboli e valori per il caso di riferimento	123
7.1	Suddivisione delle possibili scaffalature e relative specifiche dei trasloelevatori: numero minimo e massimo di livelli per tipo, velocità e accelerazioni nominali per ciascun asse, peso della macchina e costo.	138
7.2	Specifiche delle spalle utilizzate nel caso studio	140
7.3	Impatto dello sviluppo verticale sulle componenti di costo del sistema	143
7.4	COP dell'impianto di refrigerazione e proprietà dell'aria nella cella a differenti temperature di conservazione	145
7.5	Impatto della temperatura di conservazione T sui fabbisogni energetici e i costi annui del sistema	145
7.6	Impatto del throughput di sistema sul fabbisogno energetico	146
7.7	Variabili del modello	148
7.8	Parametri del modello; i valori sono relativi al caso di riferimento.	149
7.9	Parametri del modello - continuazione	150

Capitolo 1

Introduzione

In questo capitolo introduttivo si intende delineare il contesto strategico nel quale ha preso avvio la presente tesi (par.1.1). Si presenterà un'analisi delle caratteristiche del sistema oggetto di studio, ovvero i magazzini automatizzati serviti da trasloelevatori, a cui si farà riferimento nel prosieguo dello studio (par.1.2). Nel paragrafo 1.2.3 e 1.2.4 verranno presentate le due dimensioni della progettazione di un AS/RS ovvero la progettazione fisica (design fisico) e le politiche di gestione (politiche di controllo), rimandando agli specifici capitoli la review della letteratura. Si espliciteranno, infine, nel paragrafo 1.3 gli obiettivi della ricerca e la conseguente articolazione della tesi.

1.1 Contesto della ricerca

La più diffusa e condivisa definizione di sviluppo sostenibile è quella proposta dalla Brundtland World Commission on Environment and Development nel 1987 (UN, 1987), secondo cui esso va inteso come:

“The development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their needs”.

In base alla review della letteratura, Carter and Easton (2011) propongono di considerare la sostenibilità come fondata su tre principali pilastri: l'ambiente naturale, la società e la performance economica. Questa prospettiva si riallaccia chiaramente al concetto di *triple bottom line* enucleato da Elkington (1998), per il quale è possibile individuare degli interventi che sono in grado non solo di influenzare positivamente le prestazioni ambientali e sociali di un'impresa, ma anche di portare significativi benefici economici di lungo periodo e aumentarne il vantaggio competitivo.

Come sottolineato da Porter and Kramer (2006), la logistica offre grandi opportunità di individuare simili iniziative, tanto da rendere opportuno lo sviluppo di una *Sustainable* o *Green Logistics*.

Il *Sustainable supply chain management* (SSCM) e, con una maggiore enfasi sulle problematiche ambientali, il *Green supply chain management* (GSCM), hanno ricevuto dunque una crescente attenzione negli ultimi anni dalla comunità scientifica internazionale, come si può evincere dalle survey della letteratura di recente pubblicazione (Ashby et al., 2012; Seuring, 2013; Winter and Knemeyer, 2013).

Una proposta unificante delle varie definizioni di SSCM utilizzate dalla comunità internazionale è stata recentemente avanzata da Hassini et al. (2012) e Ahi and Searcy (2013), come:

“The creation of coordinated supply chains through the voluntary integration of economic, environmental, and social considerations with key inter-organizational business systems designed to efficiently and effectively manage the material, information, and capital flows associated with the procurement, production, and distribution of products or services in order to meet stakeholder requirements and improve the profitability, competitiveness, and resilience of the organization over the short- and long-term.”

La recente review di Backlund et al. (2012) sui modelli quantitativi utilizzati nell’ambito del SSCM ha messo in luce come, essendo la maggior parte degli articoli focalizzata su problematiche di produzione o su SCM in generale, sia auspicabile un approfondimento delle problematiche della sostenibilità nel campo dei trasporti e del warehousing.

Il continuo aumento dei costi energetici e il ruolo significativo ricoperto dalla generazione di energia nella produzione di gas serra clima-alteranti ha ultimamente posto l’efficienza energetica al centro dell’attenzione, essendo in grado di correlarsi al problema della sostenibilità nelle sue molteplici dimensioni, tanto da parlare della necessità di porre l’*Energy efficient manufacturing* e conseguentemente l’*Energy-aware production planning and control* (Garetti and Taisch, 2012) come obiettivo primario da perseguire, dato il significativo impatto (32,2%) del settore industriale sul consumo di energia mondiale (si veda figura 1.1).

A livello politico, la Comunità Europea ha promulgato il 25 ottobre 2012 la Direttiva 2012/27/EU (EU, 2012), che intende promuovere l’efficienza energetica all’interno dell’Unione come mezzo per il raggiungimento dell’obiettivo di riduzione del 20% del consumo di energia primaria entro il 2020.

Nel mondo aziendale, la survey promossa dalla Material Handling Industry of America (MHIA) sullo stato della sostenibilità ambientale nei settori del warehousing, distribuzione e produzione (MHIA, 2011b), ha accertato come l’efficienza energetica sia ritenuta dal 66% dei rispondenti l’obiettivo più importante da raggiungere nel prossimo futuro. In Italia, la ricerca empirica condotta da Cagno and Trianni (2013) ha evidenziato che le piccole e medie imprese guardano ormai all’efficienza energetica come ad un fattore

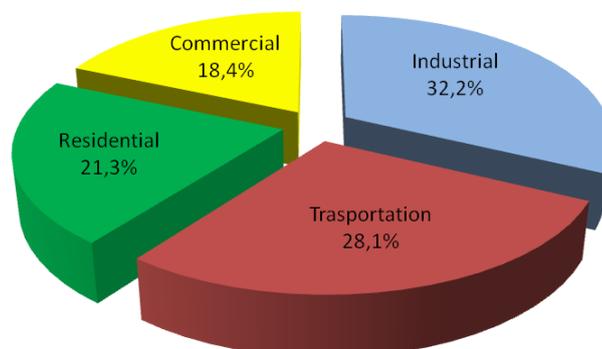


Figura 1.1. Consumo energetico mondiale per settore (2012) (fonte Energy Information Administration 2012: www.eia.gov)

strategico per la propria competitività, che va dunque perseguita con estrema urgenza.

Un utilizzo più efficiente delle risorse energetiche comporta, tuttavia, ripercussioni sulle prestazioni logistiche e i criteri progettuali tradizionalmente utilizzati per sviluppare strutture e strategie appropriate per le supply chain, come sottolineato da Halldórsson and Kovács (2010). Questo apre dunque un ampio spazio alla ricerca di nuove soluzioni e metodologie in ambito logistico.

In tale contesto prende avvio la presente tesi di dottorato, che, come spiegato in maggior dettaglio nei successivi paragrafi, si concentra sulla definizione di nuove strategie energy-based di gestione e progettazione dei magazzini automatizzati, considerati come elementi di importanza chiave all'interno delle moderne sustainable supply chain.

1.2 Oggetto della tesi

L'oggetto di studio della tesi di dottorato sono gli Automated Storage and Retrieval Systems (AS/RS), sistemi utilizzati in produzione e distribuzione per lo stoccaggio ed il recupero automatico dei materiali (Roodbergen and Vis, 2009), la cui installazione ha registrato una notevole crescita a partire dal 2010 (MHIA, 2011a).

Sono costituiti da una combinazione di apparecchiature e dispositivi di comando, che permettono di gestire, immagazzinare e prelevare materiali di vario genere (da piccoli contenitori a interi pallets di prodotti) con precisione e velocità (Wen and Chen, 2001). Gli AS/RS possono variare da macchine relativamente semplici operanti in magazzini di medie dimensioni, a grandi sistemi computerizzati totalmente integrati nei processi produttivo e distributivo. Nella maggior parte dei casi essi operano in modalità totalmente

automatizzata con un basso o nullo coinvolgimento umano nella gestione dei materiali.

Tipicamente gli AS/RS sono utilizzati in applicazioni caratterizzate da elevati volumi di materiali da movimentare, dove la densità di immagazzinamento è elevata a causa dei vincoli di spazio e dove è dunque importante un buon livello di precisione nello stoccaggio (Roodbergen and Vis, 2009).

Rispetto ai sistemi non automatizzati, gli AS/RS presentano numerosi vantaggi. Permettono una veloce, accurata ed efficiente movimentazione dei materiali, 24 ore al giorno (Gagliardi et al., 2012a); consentono di ridurre i costi della manodopera, abbassando il bisogno di forza lavoro ed incrementano la sicurezza sul posto di lavoro, evitando al personale di operare in condizioni difficili (come ad esempio gli operatori negli ambienti di stoccaggio a freddo degli alimenti). Inoltre l'utilizzo di sistemi automatizzati comporta un maggior risparmio nei costi di stoccaggio, dal momento che lo sfruttamento ottimale degli spazi del magazzino (sia verticalmente che orizzontalmente) determina una densità di stoccaggio maggiore (Hwang and Lee, 1990). Ulteriori vantaggi sono poi la riduzione dei tempi necessari per le operazioni di stoccaggio/recupero (attraverso l'eliminazione dei tempi di attesa e ricerca tipici di sistemi non automatizzati), l'aumento dell'affidabilità, la riduzione dell'incidenza degli errori di collocazione, la gestione di database sempre aggiornati sui movimenti della merce (con la possibilità di ottenere report real-time sulla giacenza) e la possibilità di abbassare la percentuale di furti (Bozer and White, 1984).

Per contro i costi dell'investimento sono molto elevati, cosiccome i costi di manutenzione e la flessibilità di riconfigurazione è ridotta (Gagliardi et al. (2012a)).

1.2.1 Componenti degli AS/RS

In seguito si introdurranno i principali componenti degli AS/RS e le nomenclature che verranno richiamate nei successivi capitoli.

Un sistema AS/RS è definito come un sistema di stoccaggio che utilizza macchine a percorso di deposito e prelevamento fisso, che si muovono su uno o più binari tra scaffalature di stoccaggio anch'esse fisse.

Generalmente un AS/RS è dunque costituito da una trasloelevatore che può muoversi lungo uno o più corridoi immagazzinando e/o prelevando i prodotti nelle scaffalature presenti su entrambi i lati del corridoio (si veda figura 1.2). I principali componenti sono (Wen and Chen, 2001):

- *Scaffalature*: strutture di metallo con locazioni in cui posizionare i carichi (es. pallet) da immagazzinare.
- *Trasloelevatori*: macchine per l'immagazzinamento/prelevamento totalmente automatizzate che possono muoversi, prelevare e rilasciare i carichi.

- *Corridoi*: spazi vuoti tra le scaffalature dove si possono muovere i trasloelevatori. Solitamente questi corridoi hanno una lunghezza compresa tra i 60 e i 240 m e sono larghi solo 20 cm in più dell'unità di crico utilizzata.
- *Punto di Input/Output (I/O)*: luogo dove i carichi prelevati dal magazzino vengono rilasciati e dove i carichi entranti vengono prelevati per essere poi stoccati.
- *Stazioni di picking*: zone (se esistono) dove gli operatori lavorano per prelevare singoli pezzi da un'unità di carico (u.d.c) precedentemente prelevata e portata fuori corsia dal trasloelevatore. Avvenuta l'operazione l'unità di carico verrà riportata nella scaffalatura dal trasloelevatore.

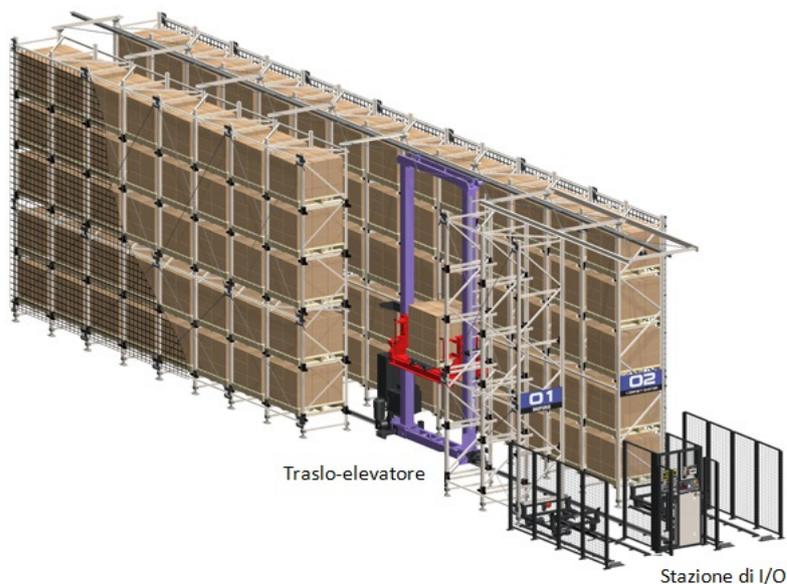


Figura 1.2. Principali componenti di un AS/RS (adattata da www.taiwandaifuku.com)

Le scaffalature tipicamente impiegate in sistemi AS/RS sono strutture metalliche che possono raggiungere fino a 54 m di altezza (Morton, 2009), i cui principali elementi costitutivi vengono rappresentati in figura 1.3). I *montanti* rappresentano gli elementi verticali di sostegno, collegati tra loro trasversalmente attraverso traversine e diagonali (*controventature*), in modo da costituire le fiancate o *spalle* della scaffalatura (si veda figura 1.3). I *correnti* sono gli elementi che collegano orizzontalmente le fiancate trasmettendo a queste le sollecitazioni dovute ai carichi, mentre gli elementi di

appoggio del carico o di collegamento tra correnti sono chiamati *rompitratte*, tali elementi servono a sostenere quelle unità di carico con configurazione degli appoggi inferiori tale da non poter essere sostenute dai soli correnti o quelle unità di carico (es. le palette di legno) che, se sostenute dai soli correnti, tendono a flettersi con il tempo. Il modulo di scaffalatura compreso tra due successive spalle viene denominato *baia*.

In linea generale le unità di carico vengono sostenute da due correnti parallele che si collegano alle spalle. Questo tipo di configurazione permette di sfruttare al massimo e con estrema flessibilità l'altezza disponibile, in quanto i posti pallet possono essere gestiti singolarmente. Infatti, sono sempre più diffuse le scaffalature in cui il collegamento tra montanti e correnti non è più realizzato tramite saldatura, ma con bulloni, morsetti o altri sistemi di fissaggio che permettano eventuali spostamenti tra i correnti dovuti a modifiche in altezza delle unità di carico. Per quanto riguarda invece la larghezza dei ripiani della scaffalatura si possono prevedere più o meno montanti a seconda delle esigenze. Si possono così avere scaffalature monoposto (con un montante per ogni u.d.c) o pluriposto (con un montante ogni due o più u.d.c). Nella soluzione monoposto i montanti, a parità di peso e dimensione dei carichi, hanno un'incidenza ponderale ed un ingombro orizzontale complessivamente maggiori, mentre i correnti hanno una sezione resistente minore. Il peso minore e il minor ingombro dei correnti permette dunque un miglior sfruttamento in altezza dello spazio a disposizione (Monte, 2003).

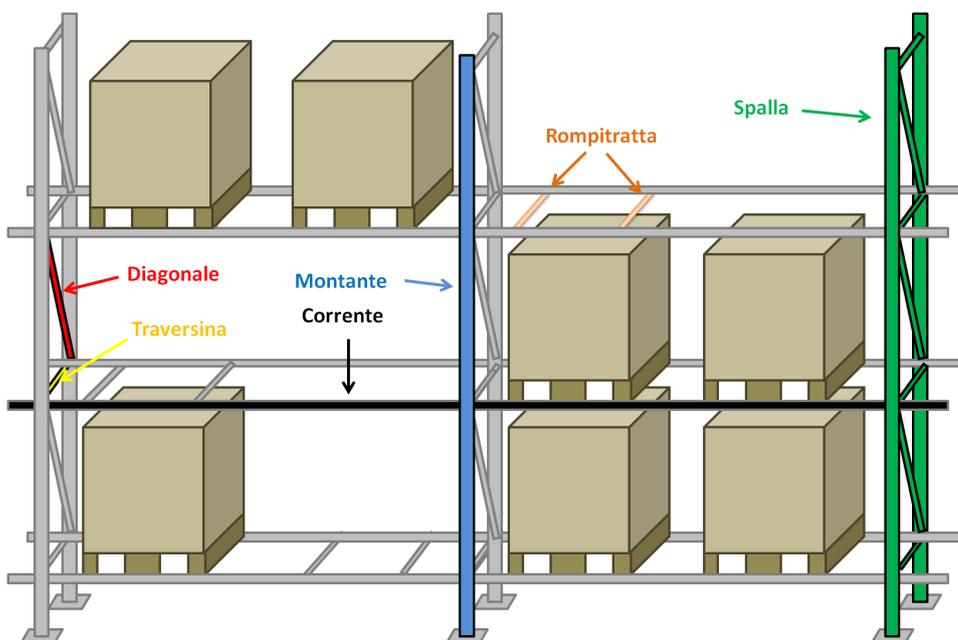


Figura 1.3. Elementi costitutivi delle scaffalature metalliche

Nel corridoio che separa le scaffalature scorre il *trasloelevatore*. I tra-

sloelevatori sono robot a tre assi, realizzati su misura per ogni esigenza del magazzino e concepiti per il trasporto di pallet, contenitori, pacchi, cassette, o altre tipologie di unità di carico. Essi si possono muovere in verticale (asse y), alzando e abbassando le u.d.c, e in orizzontale, muovendo le u.d.c lungo il corridoio (asse x). Inoltre si muovono anche lungo un terzo asse (asse z) per inserire o prelevare le u.d.c dalla loro locazione nella scaffalatura o per prelevare/depositare i carichi alla stazione di I/O. La varietà e la versatilità delle configurazioni dei trasloelevatori in termini di altezza (da altezze minime di 4 metri fino ad altezze di 54 m (Morton, 2009)), capacità di carico, numero di u.d.c, conformazione della struttura (monocolonna o bicolonna) e organo di presa, permette di ottimizzare l'utilizzo dello spazio e di gestire molteplici unità di carico.

I trasloelevatori sono tipicamente composti da una *piattaforma mobile* al cui interno vi è l'organo di presa (forche telescopiche in acciaio ad alta resistenza solitamente azionate da un sistema pignone-cremagliera e da un motoriduttore). Tale piattaforma si muove lungo una colonna verticale (o due colonne per portate superiori ai 2000 kg) a sua volta traslabile lungo il corridoio delimitato lateralmente dalle due scaffalature. La colonna è fissata ad una trave inferiore su due ruote portanti, una motrice ed una condotta, scorrevoli su una rotaia ancorata al pavimento. La verticalità del traslatore è mantenuta grazie ad apposite ruote di contrasto che, superiormente alla colonna verticale, scorrono lungo un profilato di acciaio fissato alla struttura portante della copertura del magazzino o alla controventatura degli scaffali.

La piattaforma mobile scorre lungo la colonna grazie a catene, cinghie o funi portanti collegate ad una estremità con il telaio stesso e all'altra con l'apparato motore. Il rinvio è posto sopra la trave superiore ed è costituito da pignoni nel caso di catene o da carrucole montate su cuscinetti a rotolamento nel caso di funi (Figura 1.4).

Le *forche telescopiche* sono composte da un corpo fisso ed elementi sovrapposti i quali si muovono in modo telescopico bilaterale per la traslazione di carichi rispetto al centro. Esse consentono dunque la traslazione sull'asse z del trasloelevatore per l'immagazzinamento/prelevamento dei carichi nelle celle della scaffalatura.

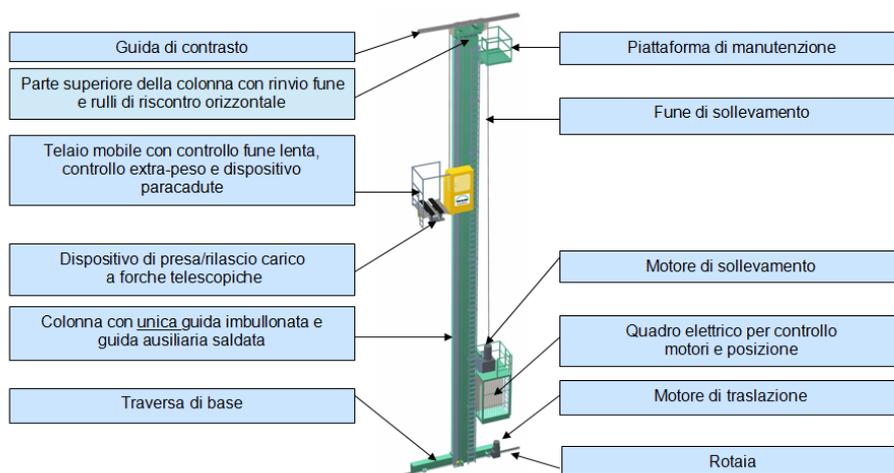
I trasloelevatori possono inoltre lavorare su un singolo corridoio oppure possono eseguire il cambio su più corridoi per mezzo di *ponte di trasbordo* o rotaie in curva.

Le specifiche dei trasloelevatori, nonchè i loro costi, sono fortemente influenzati dalle altezze delle scaffalature da servire. Generalmente per scaffalature molto sviluppate verticalmente le velocità e accelerazioni di traslazione orizzontale, a causa della massa superiore da movimentare, risultano essere inferiori rispetto a quelle raggiungibili dai trasloelevatori utilizzati per scaffalature di altezza inferiore. In tabella 1.1 vengono riportate le principali specifiche di due trasloelevatori utilizzati per servire geometrie opposte

Tabella 1.1. Principali specifiche dei trasloelevatori.

	Configurazione della scaffalatura	
	10 × 99	22 × 45
Trasloelevatore		
Velocità orizzontale [m/s]	4,0	3,0
Accelerazione orizzontale [m/s^2]	0,8	0,4
Velocità verticale [m/s]	0,9	0,9
Accelerazione verticale [m/s^2]	0,8	0,6
motore asse x		
Velocità [rpm]	2600	2509
Momento d'inerzia [kgm^2]	0,093	0,0093
Coppia massima [Nm]	240	240
motore asse y		
Velocità [rpm]	3825	2579
Momento d'inerzia [kgm^2]	0,022	0,093
Coppia massima [Nm]	191	240

di scaffalatura (una scaffalatura con 10 ripiani e 99 colonne e una con 22 ripiani e 45 colonne).

**Figura 1.4.** Elementi costitutivi del trasloelevatore. Tratto da www.lcssrl.it

1.2.2 Tipologie di AS/RS

Esiste un grande numero di opzioni possibili per la configurazione di un AS/RS. La versione base, chiamata *single unit-load aisle captive AS/RS*,

prevede un trasloelevatore per ogni corridoio (*aisle-captive*), il quale può trasportare una sola unità di carico alla volta (*single shuttle*). Con questa configurazione i prodotti vengono prelevati/immagazzinati per unità di carico e non vi sono pertanto persone coinvolte nel prelevamento di singoli prodotti dall'unità di carico. Inoltre la scaffalatura è a singola profondità, ciò significa che ogni carico è direttamente accessibile dal trasloelevatore. A partire da tale configurazione base si possono poi trovare diverse alternative. In figura 1.6 viene presentata una panoramica delle principali opzioni esistenti, che saranno brevemente trattate di seguito.

Una prima possibile variazione dall'AS/RS base si ha quando i trasloelevatori sono in grado di cambiare corsia. In questa configurazione, chiamata *single unit-load aisle changing*, i trasloelevatori possono quindi operare su più corsie. Tale soluzione permette di minimizzare il numero di trasloelevatori e risulta vantaggiosa quando il numero di richieste di immagazzinamento/prelevamento non sia tale da giustificare l'utilizzo di un trasloelevatore per ogni corridoio. Anche in questo caso, come per il *single unit-load aisle captive* AS/RS le scaffalature sono a singola profondità.

Per superare le restrizioni in termini di capacità dei trasloelevatori *single shuttle* esistono poi i trasloelevatori multi shuttle, che possono trasportare due (*dual-shuttle cranes*) o più carichi alla volta (molto rari). L'aumento della capacità di trasporto rende possibile ad esempio il prelievo di un'unità di carico e il deposito di un'altra senza dover necessariamente ritornare al punto di I/O.

Solitamente gli AS/RS sono utilizzati per trattare solamente delle unità di carico, come possono essere i carichi pallettizzati. Queste u.d.c. arrivano all'I/O da altre parti del magazzino attraverso sistemi di trasporto quali i veicoli guidati automaticamente (AGV), i nastri trasportatori, gli elevatori, etc. Le unità sono quindi immagazzinate nel sistema AS/RS e dopo un periodo di tempo vengono prelevate di nuovo ad esempio per essere consolidate e spedite al cliente. In molti casi tuttavia solo una parte dell'unità di carico è necessaria a soddisfare l'ordine del cliente e si ha pertanto la necessità di prelevare solo una parte di materiale dall'u.d.c. Questa attività, chiamata *picking frazionato*, può avvenire in diverse modalità. Le operazioni di picking possono essere integrate nell'AS/RS stesso; un'opzione possibile è quella di progettare un trasloelevatore che possa ospitare un operatore a bordo (*person-on-board*) in modo che sia possibile evitare il prelievo dell'intera unità di carico dalla locazione, poiché l'operatore può effettuare direttamente il prelievo del singolo elemento dalla scaffalatura. La configurazione più comune per integrare il picking prevede tuttavia di utilizzare il trasloelevatore per depositare l'unità di carico fuori corsia nella stazione di lavoro, dove un operatore preleva il numero richiesto di componenti; dopodiché l'unità di carico viene rimessa nella sua locazione dalla macchina R/S. Questa modalità viene chiamata *end-of-aisle system*.

L'immagazzinamento nella scaffalatura può essere a singola o doppia pro-



Figura 1.5. Satellite a servizio della scaffalatura a profondità multipla. Fonte: www.modulblok.com

fondità (*single o double-deep*). In una scaffalatura a doppia profondità c'è spazio per due unità di carico immagazzinate una di fronte all'altra. In questo modo un'unità di carico può essere immagazzinata o prelevata dalla seconda posizione solo se non ce n'è una in prima posizione. L'immagazzinamento a doppia profondità è vantaggioso se il numero di codici da gestire, i lotti di rifornimento e il turnover sono tali da garantire selettività unitaria, ovvero, è possibile stoccare u.d.c. del medesimo codice in profondità. In tal modo il prelievo può essere fatto senza dover movimentare altre u.d.c. per accedere al carico. La recente introduzione di AS/RS dotati di sistema satellite permette di ottenere profondità multiple (*multiple-deep*). I sistemi satellite a servizio della scaffalatura a profondità multipla sono costituiti essenzialmente da una macchina con batteria ricaricabile a controllo remoto, capace di posizionare in profondità i singoli pallet da stoccare, prelevarli dalla posizione di stoccaggio e ripresentarli in testa alle corsie, tutto in modo automatico (si veda figura 1.5). Per la fase di prelievo, il satellite viene caricato nella stazione di I/O a bordo del trasloelevatore e grazie ad esso raggiunge la testata della corsia dove prelevare il carico. Scorre lungo i canali della corsia fino a raggiungere il carico da prelevare e, successivamente ad una fase di allineamento e controllo, alza (grazie alla piattaforma mobile) di qualche centimetro il carico in modo tale da poterlo sfilare, riportandolo in testa alla corsia, dove dopo averlo riposto, attende il trasloelevatore per completare l'operazione di prelievo. In modo del tutto analogo si svolge la fase di stoccaggio.

L'originale schema di Roodbergen and Vis (2009) (figura 1.6) è stato quindi modificato per includere i sistemi *multiple-deep*, che saranno oggetto di studio nel capitolo dedicato ai magazzini refrigerati.

Le scaffalature possono essere anche mobili. Ad esempio i sistemi a caro-

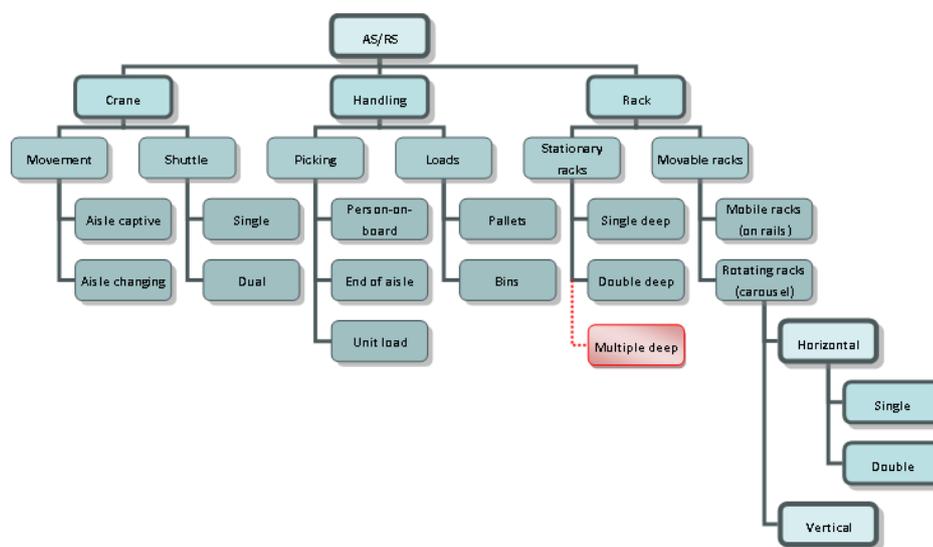


Figura 1.6. Tipologie di AS/RS. (Adattato da Roodbergen and Vis (2009))

sello (*carousel systems*) siano essi orizzontali, verticali, singoli o doppi, sono utili per immagazzinare prodotti di piccole dimensioni a diversi livelli. Il trasloelevatore viene in questo caso utilizzato per immagazzinare/prelevare i prodotti dal carosello rotante.

Infine un tipo speciale di AS/RS degno di nota è l'*autonomous vehicle storage and retrieval system* (AVS/RS). In questo sistema i movimenti verticale e orizzontale sono separati; i veicoli viaggiano orizzontalmente su rotaia attraverso i corridoi, mentre degli elevatori vengono utilizzati per trasferire i carichi verticalmente. Dato che il movimento non avviene simultaneamente sui due assi, tali sistemi portano a tempi di viaggio maggiori rispetto a quelli ottenibili dagli AS/RS (Malmborg, 2002). Un notevole vantaggio di questi sistemi è l'adattabilità della capacità produttiva del sistema alle variazioni di domanda, ad esempio variando il numero di veicoli circolanti per una fissata configurazione di stoccaggio (Ekren et al., 2010).

1.2.3 La progettazione di un sistema AS/RS

La progettazione di un magazzino automatizzato risulta essere un'attività piuttosto complessa e di cruciale importanza, in quanto deve supportare efficacemente le richieste correnti e future del sistema e nello stesso tempo deve evitare colli di bottiglia e sovracapacità. Visti gli elevati costi di riconfigurazione, l'inflessibilità del layout fisico e delle attrezzature, risulta facile capire l'importanza di una corretta progettazione. Va inoltre ricordato che nei magazzini automatizzati l'AS/RS è solamente uno dei tanti sistemi di movimentazione e per tale ragione la sua performance viene influenzata da

quella degli altri sistemi e viceversa. Un esempio è l'interconnessione che si ha nei punti di Input/Output (I/O). I carichi vengono prelevati/rilasciati al punto di I/O dall'AS/RS, mentre è compito di un sistema di trasporto (es. nastro trasportatore, veicoli guidati automaticamente) realizzare la connessione tra l'I/O e il resto del magazzino. I ritardi di un sistema possono quindi causare ritardi nell'altro sistema. Quando si progetta il numero di punti I/O, la loro locazione e capacità può essere necessario guardare anche alle caratteristiche degli altri sistemi presenti. In linea generale è dunque necessaria una progettazione integrata dell'intero magazzino.

I requisiti di un sistema AS/RS possono dipendere dal contesto applicativo. In ambiente manifatturiero l'AS/RS deve garantire il rifornimento dei materiali in tempo affinché la produzione possa continuare senza interruzioni. In ambiente distributivo l'AS/RS realizza o supporta il processo di prelevamento dei materiali per assicurare che gli ordini clienti lascino il magazzino in tempo.

La progettazione in senso lato di un AS/RS si delinea lungo le due dimensioni della configurazione fisica (design fisico) e della gestione (politiche di controllo): in figura 1.7 si propone una schematizzazione delle relative problematiche. Quest'ultime verranno introdotte nei successivi paragrafi, rimandando l'analisi della letteratura agli specifici capitoli della tesi.

Design fisico

Il design fisico prevede, in primo luogo, la *scelta del tipo di AS/RS* e successivamente la *configurazione del sistema* stesso.

Queste scelte, correlate tra loro, possono essere fatte sulla base di vari fattori quali i dati storici e previsionali, le caratteristiche del prodotto, il budget a disposizione, la produttività richiesta al sistema, lo spazio necessario e quello effettivamente a disposizione.

Per quanto riguarda la scelta del sistema, nel paragrafo precedente (figura 1.6) sono state discusse le varie tipologie di AS/RS, a partire dal tipo di trasloelevatore, di movimentazione del carico e di scaffalatura.

Per quanto riguarda invece la configurazione del sistema, nella parte sinistra della figura 1.7 vengono schematizzate le varie decisioni da intraprendere per strutturare l'area di stoccaggio secondo una configurazione ottimale attraverso il collocamento funzionale delle diverse entità (corridoi, scaffalature, aree di prelievo e stoccaggio etc...) nel modo più efficace ed efficiente possibile.

Tipicamente, la capacità totale del sistema viene specificata dai clienti e costituisce quindi un dato di input e un vincolo da rispettare nella progettazione. Ciò fa insorgere diversi trade-off. Infatti, l'aumento del numero di corridoi si traduce nella diminuzione dell'altezza e/o della lunghezza delle scaffalature per mantenere la capacità desiderata costante. A causa di questa relazione avere più corridoi porta indirettamente a tempi di risposta minori,

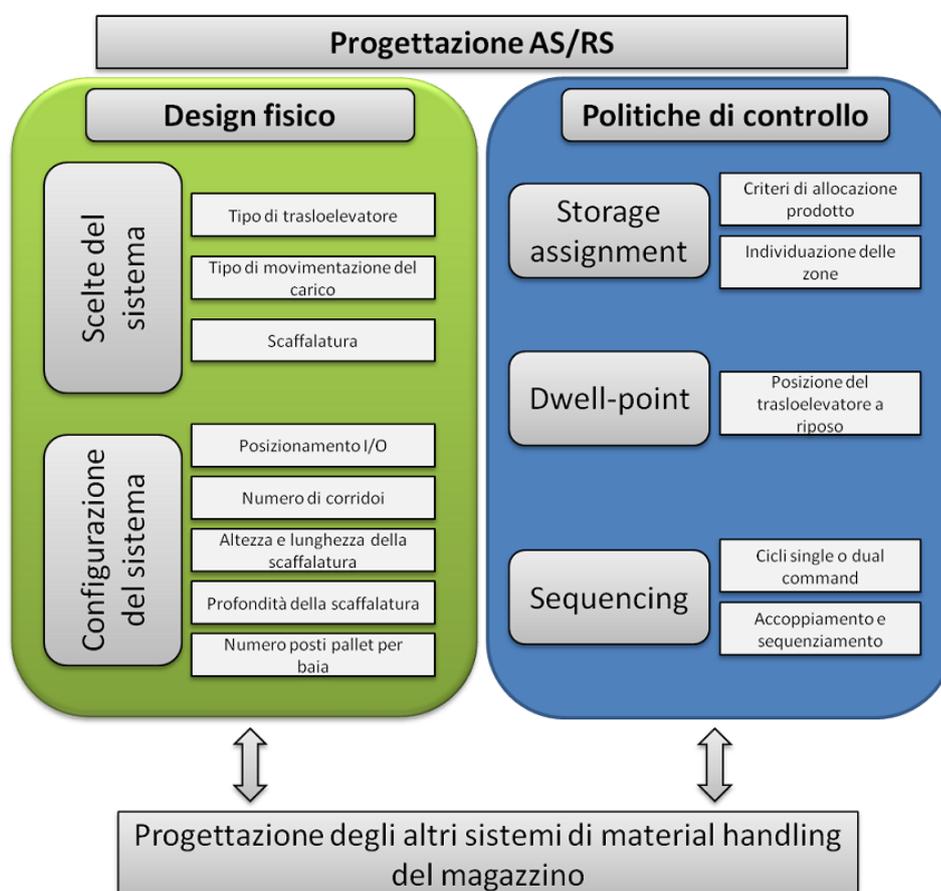


Figura 1.7. Problematiche della progettazione di un sistema AS/RS

dato che diminuisce la lunghezza e/o altezza delle scaffalature. Avere più corridoi significa avere più trasloelevatori, il che comporta sia un aumento della capacità produttiva sia un aumento, però, dei costi di investimento.

Anche quando il numero di corridoi è dato, vi è ancora un trade-off tra lunghezza e altezza della scaffalatura: un giusto bilanciamento di queste componenti può ridurre significativamente il tempo di viaggio. Infatti i trasloelevatori possono muoversi contemporaneamente in orizzontale e in verticale e le velocità sui due assi sono diverse; il tempo di viaggio, pertanto, risulta essere dato dal valore massimo tra il tempo di viaggio orizzontale e quello verticale (distanza di Chebyshev). Da questa considerazione si possono individuare due tipi di configurazione delle scaffalature, una chiamata *square-in-time* nella quale il tempo necessario per raggiungere la colonna più lontana è pari al tempo necessario per raggiungere il ripiano più alto e una chiamata *rectangular* dove questi tempi sono diversi.

Spesso le scaffalature hanno locazioni di stoccaggio tutte della stessa di-

mensione. Tuttavia, per soddisfare una domanda sempre più variabile dei clienti, è possibile trovare scaffalature che possano consentire l'immagazzinamento di carichi di diversa forma. Le scaffalature possono inoltre contenere in profondità una o più unità di carico (profondità singola o multipla) ed avere baie con diverso numero di unità di carico per livello.

Ulteriori decisioni sulla configurazione di sistema sono poi legate al numero e alla posizione dei punti di Input/Output (I/O). È possibile ad esempio collocare l'I/O ad inizio corridoio, al centro o in fondo, separando così i flussi di entrata e uscita. La soluzione più utilizzata rimane tuttavia quella che prevede un unico punto di I/O posto in basso in prossimità dell'inizio del corridoio.

1.2.4 Politiche di controllo

Tanto importanti quanto la progettazione fisica sono le politiche di controllo necessarie per rendere operativo l'AS/RS. Una buona metodologia di progettazione dovrebbe dunque trattare contemporaneamente sia la progettazione fisica che il controllo del sistema, sebbene in letteratura questi due aspetti siano stati in generale analizzati separatamente (Roodbergen and Vis, 2009).

Le politiche di controllo rappresentano gli strumenti per una gestione ottimizzata dell'operatività dell'AS/RS. Tipicamente l'operatività di un AS/RS è governata da un insieme coerente di queste politiche di controllo, ognuna delle quali tiene conto di uno specifico sottoinsieme di attività. In seguito verranno presentate le principali politiche di controllo rimando l'analisi della letteratura agli specifici capitoli della tesi.

Lo *storage assignment* è l'attività di assegnazione dei prodotti alle locazioni delle scaffalature e consiste in un insieme di regole atte a determinare il posizionamento delle unità di carico nel magazzino (Gu et al., 2007). Si individuano due concezioni contrapposte di assegnazione dei prodotti a magazzino: le logiche dedicate (*dedicated storage*) e le logiche condivise (*shared storage*). Con le prime, le locazioni vengono riservate in modo esclusivo ai prodotti per tutto l'orizzonte di pianificazione; ciò comporta che il magazzino debba essere dimensionato per una *potenzialità ricettiva* pari alla somma dei massimi delle giacenze previste di ciascun prodotto nel medesimo orizzonte temporale. Nelle logiche *shared storage*, invece, le unità di carico sono libere di occupare tutte le locazioni disponibili di una data zona: un sottoinsieme della scaffalatura viene in questo modo "condiviso" da più prodotti. Si assiste così ad una compensazione dei picchi e delle valli di giacenza dei diversi prodotti nell'orizzonte di pianificazione, con una *potenzialità ricettiva* richiesta pari al massimo della somme complessive delle giacenze previste per i vari periodi di programmazione in cui è scomposto l'orizzonte temporale, che risulta dunque di gran lungo inferiore a quella richiesta dalle politiche dedicate.

Le politiche *dwell-point* servono a determinare la posizione del trasloelevatore a riposo, cioè in attesa di comando; è infatti possibile muovere in anticipo la macchina in modo da collocarla in una posizione verosimilmente più conveniente per servire la prossima locazione.

Il trasloelevatore può operare secondo due differenti tipi di ciclo: *single command* o *dual command*. Nel primo caso il trasloelevatore esegue una singola operazione di immagazzinamento o prelievo per poi riportarsi nella posizione di riposo. Pertanto, il tempo necessario per effettuare il ciclo di stoccaggio sarà pari alla somma del tempo di prelievo del carico dalla stazione di I/O, del tempo per raggiungere la postazione di immagazzinamento, del tempo per stoccare l'unità di carico nella scaffalatura e del tempo di ritorno a vuoto alla postazione di riposo. Simmetricamente si calcolerà il tempo per il ciclo singolo di prelievo, in cui il trasloelevatore viaggia a vuoto fino a raggiungere la locazione di prelievo, per poi tornare a carico alla stazione di I/O. Nel ciclo *dual command*, invece, lo stoccaggio e il prelievo vengono combinati tra loro, in modo da limitare i viaggi a vuoto del trasloelevatore. Il tempo di ciclo doppio sarà dato dalla somma del tempo per la messa a bordo del carico dalla stazione I/O, del tempo per raggiungere la locazione di stoccaggio, del tempo di immagazzinamento, del tempo per raggiungere la successiva locazione di prelievo (chiamato anche *interleaving*), del tempo di prelievo dell'u.d.c. e del tempo per portare il carico alla stazione di I/O. Chiaramente il tempo totale di un ciclo *dual command* è inferiore a quello del doppio ciclo semplice di prelievo e stoccaggio necessario a completare le medesime operazioni.

Le politiche di *sequencing* vengono dunque utilizzate per creare dei tour (insieme di cicli singoli o doppi) atti a minimizzare il tempo totale di evasione delle richieste. In particolare, il problema dell'identificazione dei *dual command cycle* più opportuni prevede due diversi tipi di decisione: quale articolo presente nella lista degli stoccaggi da eseguire debba essere accoppiato con quale articolo appartenente alla lista dei prelievi richiesti per formare il ciclo doppio e quali locazioni di stoccaggio e prelievo debbano essere selezionate per ottimizzare le prestazioni del sistema.

Tra le politiche di *sequencing*, il *batching* consiste nello stabilire come si possano combinare i diversi ordini dei clienti in un singolo tour del trasloelevatore; tale politica viene unicamente utilizzata per AS/RS con persone a bordo e per attività di picking frazionato.

1.3 Obiettivi e articolazione della tesi

In tempi di *quick response* e di orientamento alla *customer satisfaction* la logistica è diventata uno dei fattori determinanti per la competitività aziendale. In questo contesto, il ruolo degli AS/RS riveste una significativa importanza, in quanto tali sistemi permettono di effettuare consegne complete,

veloci e puntuali. Le performance di tempo degli AS/RS sono direttamente collegate al livello di servizio percepito dai clienti (de Koster et al., 2007); per tale ragione, l'attenzione della letteratura, per le varie problematiche illustrate in figura 1.7, è stata tradizionalmente rivolta all'ottimizzazione delle prestazioni temporali.

I nuovi paradigmi legati alla sostenibilità (par. 1.1) spingono verso un cambiamento di prospettiva, cercando di spostare il focus sull'efficienza energetica. Gli AS/RS sono stati riconosciuti "*to make a play for sustainability*" (MHIA, 2009) in quanto permettono un migliore utilizzo dello spazio, consentendo di stoccare lo stesso numero di unità con un minor ingombro con conseguente minor utilizzo di cemento e una riduzione delle relative emissioni di gas serra clima-alteranti. Sfruttando lo spazio verticale, inoltre, permettono di contenere i consumi di energia per il riscaldamento, il raffreddamento, l'illuminazione e la ventilazione.

Gli AS/RS richiedono, tuttavia, energia per gli spostamenti del traslocatore e questo aspetto è stato del tutto trascurato nei processi di ottimizzazione di tali strutture. Da queste considerazioni nasce l'obiettivo della presente tesi, che si propone dunque di rivisitare i tradizionali modelli *time-based* per la configurazione e gestione degli AS/RS secondo la nuova ottica *energy-based*.

Verranno quindi analizzate nuove tipologie di AS/RS indotte dalla prospettiva energetica, quali le scaffalature a singola profondità stratificate e le scaffalature a profondità multipla; si introdurranno nei modelli per l'ottimizzazione della configurazione del sistema del costo energetico e dell'impronta carbonica, non presenti nella letteratura corrente (si veda parte sinistra dello schema in fig. 1.8).

Per quanto concerne le politiche di controllo, verranno sia analizzate dal punto di vista energetico le tradizionali strategie di storage assignment, dwell point e sequencing, sia proposte nuove politiche atte ad aumentare le prestazioni energetiche del sistema (si veda parte destra dello schema in fig. 1.8).

La tesi verrà articolata nel seguente modo (si veda fig. 1.8): nel capitolo 2 verranno inizialmente presentati i modelli di tempo e di energia che saranno alla base degli studi successivi, introducendo un indice caratteristico dei consumi energetici per una data scaffalatura chiamato *Rack Energy Potential*(REP).

Nel capitolo 3 verranno analizzate le politiche di storage assignment introducendo una nuova politica di assegnazione dedicata: la *energy-based full turnover policy*. Verrà valutato come si modificano le zone associate a ciascun prodotto e verranno confrontate le prestazioni sia temporali che energetiche della nuova politica con quelle della tradizionale time-based full turnover policy. Si valuterà poi l'impatto del recupero energetico e del peso sulle prestazioni delle politiche di assegnazione dedicata sia per quanto concerne la forma e disposizione delle zone dedicate ai prodotti, sia per quanto riguarda

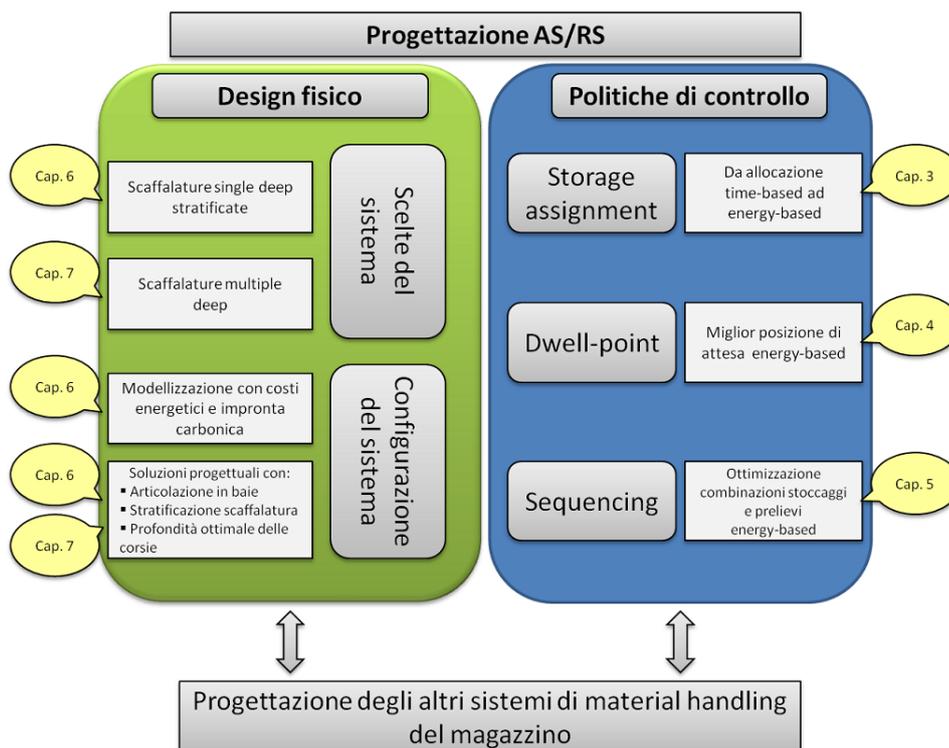


Figura 1.8. Problematiche di design fisico e politiche di controllo affrontate in ottica sostenibile e relativa articolazione della tesi

le relative prestazioni energetiche, chiedendosi quale sia il ruolo del peso del carico nel processo di allocazione energy-based e, dato che il tempo non è influenzato dal peso del carico, quale sia il divario tra le prestazioni time-based ed energy-based in presenza di prodotti di peso differente. A tal fine, verrà proposta una particolare tipologia di allocazione nella quale si stratifica la scaffalatura in fasce differenti di peso e si confronteranno le prestazioni di energia per allocazioni di tipo dedicato, per classi e random per diverse curve di domanda e geometrie della scaffalatura. Infine, con l'obiettivo di migliorare la flessibilità massimizzando l'efficienza energetica, si introdurranno e valuteranno delle nuove politiche dinamiche di allocazione energy-based.

Una tipica decisione di pianificazione degli Automated Storage and Retrieval Systems è la posizione di *dwell point*, ovvero la posizione in cui il trasloelevatore, in fase di inattività, attende fino alla successiva operazione da compiere. Nell' capitolo 4 è stata affrontata questa problematica, valutando la posizione ottimale sia dal punto di vista temporale che da quello energetico, confrontandone le performance di tempo ed energia per un'allocazione di tipo dedicato.

Il capitolo 5 conclude l'analisi delle politiche di controllo nella prospettiva sostenibile, proponendo degli algoritmi di ottimizzazione dell'accoppiamento

e sequenziamento di stoccaggi e prelievi al fine di minimizzare l'energia di movimentazione. In questo capitolo vengono definiti dei modi efficaci per combinare le richieste di stoccaggio e prelievo dal punto di vista energy based, valutando le prestazioni che si possono ottenere dall'adozione di cicli doppi, per una politica di allocazione dedicata che riduce al minimo i consumi legati al viaggio dalla stazione di input alla locazione di stoccaggio e quelli dalla locazione di prelievo alla stazione di output. Infine, viene valutato in che misura l'efficienza energetica dei cicli *dual command* possa essere ulteriormente migliorata con l'adozione di una strategia di allocazione dinamica anziché dedicata.

Nel capitolo 6 verranno proposti due modelli di ottimizzazione economica e ambientale come strumento di supporto alle decisioni per la progettazione di magazzini automatizzati sostenibili; tali modelli sono separati per permettere di identificare il potenziale trade-off tra i diversi aspetti della sostenibilità, cosiccome le eventuali convergenze, in modo da identificare possibili compromessi o best practices atti a favorire una logistica sostenibile. I modelli sono stati concepiti per fornire in output una configurazione più dettagliata dell'AS/RS di quanto presente in letteratura, stabilendo l'articolazione delle baie, dimensionando le sezioni resistenti degli elementi della scaffalatura e valutando l'opportunità della stratificazione.

Nel capitolo 7, infine, si affronterà il problema della progettazione di un AS/RS refrigerato (Refrigerated Automated Storage and Retrieval System, R-AS/RS), tipologia di magazzino che ha trovato ampio impiego negli ultimi anni nel settore alimentare per la conservazione di prodotti surgelati. Nel capitolo viene introdotto un nuovo modello di ottimizzazione, che considera un sistema di movimentazione con satellite a controllo remoto lungo le corsie a profondità multipla e tiene conto dei costi energetici di refrigerazione e movimentazione. Tale modello vuole essere uno strumento di supporto alle decisioni e ai principali interrogativi a cui un progettista di R-AS/RS si trova a dover rispondere durante lo studio di fattibilità del sistema; il modello indica la profondità delle corsie maggiormente adeguata alla politica di rifornimento del magazzino, valuta il numero ottimale di livelli verticali di u.d.c. e il numero di colonne a profondità multipla per ciascun corridoio di servizio che garantiscono la capacità di stoccaggio richiesta e definisce il numero di corridoi e trasloelevatori necessari per soddisfare il throughput richiesto per una dato livello di produttività del sistema.

Capitolo 2

Modelli di tempo ed energia

Nel presente capitolo si descrivono i modelli elaborati per la valutazione del tempo e dell'energia necessari per raggiungere le locazioni della scaffalatura posta ai lati di ciascun corridoio di un AS/RS. Nel primo paragrafo vengono stabilite le ipotesi di base comuni ai modelli di tempo ed energia; nel secondo paragrafo viene proposto il modello per il calcolo del tempo di viaggio per i trasloelevatori di nuova generazione. Successivamente, nel terzo paragrafo, viene descritto il modello ideato per la stima del consumo energetico associato allo spostamento del trasloelevatore, corredato da un esempio numerico di calcolo dell'energia necessaria a servire una fissata locazione all'interno della scaffalatura. Si introduce infine nel quarto paragrafo un indice di prestazione energetica associabile ad una data configurazione di scaffalatura, che verrà utilizzato nei successivi capitoli.

2.1 Ipotesi preliminari

Si considera un AS/RS avente le seguenti caratteristiche:

- sistema con un trasloelevatore per ogni corridoio (*aisle captive AS/RS*, si veda par. 1.2.2);
- in ogni lato del corridoio vi è una scaffalatura con nH ripiani e nL colonne;
- i trasloelevatori sono di ultima generazione: in tali macchine i movimenti orizzontali e verticali non solo avvengono simultaneamente, ma vengono completati anche nel medesimo istante, grazie ad un programma di interpolazione del sistema di controllo e l'utilizzo di un sistema retro-azionato;
- tutti i viaggi di immagazzinamento e prelievo iniziano con il trasloelevatore situato alla stazione di input/output (I/O); come si verificherà

nel capitolo relativo al *dwell point* (cap. 4), questa posizione rappresenta la locazione di sosta ottimale dal punto di vista energetico e un buon compromesso anche per la prestazione temporale;

- il punto di I/O viene posto all'angolo in basso a sinistra del corridoio.

Dal momento che si è assunto che ogni corridoio venga servito da un trasloelevatore, è sufficiente analizzare un solo fronte di scaffalatura, essendo il resto del sistema una replicazione di tale modulo. Volendo, inoltre, comparare i tempi di viaggio e il consumo energetico tra le varie locazioni, non si sono considerati i tempi e le energie che risultano invarianti rispetto alla posizione da servire nella scaffalatura. Vengono dunque trascurati i tempi e le energie di sollevamento e abbassamento del carico necessari per sfilarlo e posarlo in modo corretto nelle locazioni ad esso destinate e i parametri relativi all'asse z , ovvero al movimento telescopico delle forche. Viene infine trascurato il movimento di estrazione e immissione del carico all'input/output.

2.2 Profili di velocità e calcolo dei tempi di viaggio

Il trasloelevatore possiede tre motori asincroni trifasi indipendenti, uno per ciascun asse. Trascurando il movimento lungo l'asse z e dato che gli spostamenti lungo x e y avvengono simultaneamente, il tempo di viaggio verrà calcolato considerando il massimo valore tra il tempo dovuto al movimento orizzontale e quello necessario per la traslazione verticale. Viene dunque utilizzata come misura di distanza la metrica di Chebyshev.

La maggior parte della letteratura sugli AS/RS è stata sviluppata partendo dal modello semplificato di tempo proposto da Bozer and White (1984), che considera un moto rettilineo uniforme per entrambi gli assi. L'accelerazione, tuttavia, assume un ruolo fondamentale qualora si consideri il consumo di energia e non può essere ulteriormente trascurata; risulta pertanto necessario, ai fini di una corretta valutazione del consumo energetico, descrivere i movimenti del trasloelevatore con un moto rettilineo uniformemente accelerato.

Come evidenziato da Hwang and Lee (1990), il profilo di velocità per gli assi orizzontale e verticale può essere triangolare (fase di accelerazione e susseguente fase di decelerazione), quando la velocità massima consentita non può essere raggiunta a causa di limitati spostamenti, o trapezoidale, quando si possono ottenere in sequenza una fase di accelerazione, una fase a velocità costante e una fase di decelerazione (si veda figura 2.1).

Al fine di ridurre il consumo energetico, come assunto nel paragrafo precedente, i trasloelevatori di nuova generazione sono controllati in modo tale che i movimenti orizzontale e verticale non solo avvengano simultaneamente, ma finiscano anche nello stesso istante. Questo significa che il profilo di velocità del moto più veloce deve essere modificato al fine di completare

la traslazione nello stesso tempo del movimento più lento (i parametri modificati verranno contrassegnati con l'apice '). A tal fine si è ipotizzato di mantenere costanti le accelerazioni ($a' = a$), ma di diminuire il tempo di accelerazione e la conseguente velocità massima raggiungibile in modo da completare lo spostamento nel medesimo tempo del movimento più lento. Si ottengono dunque, delle fasi di accelerazione più brevi ($t'_A < t_A$) e fasi a velocità costante inferiore in modulo ($v'_{max} < v_{max}$) e superiore per durata ($t'_{CS} > t_{CS}$) (si veda il trapezio grigio in figura 2.1).

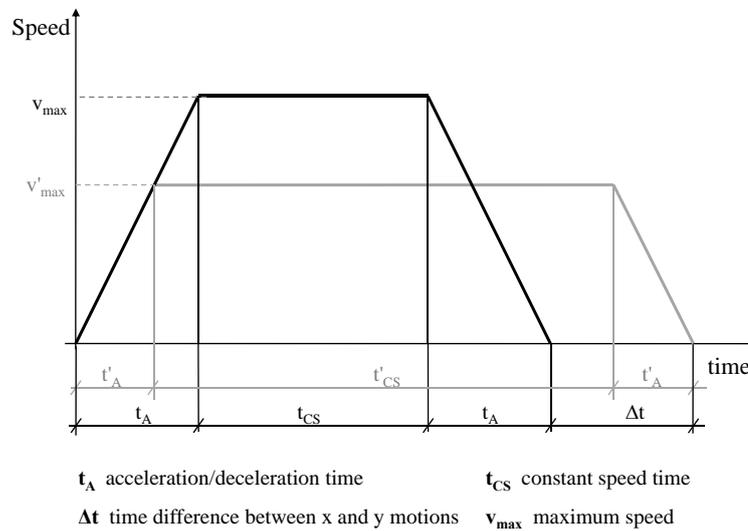


Figura 2.1. Variazione del profilo di velocità per il moto più veloce necessario per completare lo spostamento nello stesso tempo di quello più lento (differenza di tempo Δt). In colore nero viene rappresentato il profilo di velocità originale (t_A, t_{CS}, v_{max}), in colore grigio il nuovo profilo (t'_A, t'_{CS}, v'_{max})

Un metodo alternativo per approssimare l'arrivo contemporaneo alla localizzazione è quello, per il moto più veloce, di mantenere costante la durata della fase a velocità massima ($t'_{CS} > t_{CS}$; $v'_{max} = v_{max}$) e variare i valori di accelerazione ($a' < a$; $t'_A > t_A$), modificando la pendenza dei lati obliqui del trapezio dell'andamento delle velocità nel tempo (si veda figura 2.2). Nello sviluppo del modello sono stati valutati entrambi i metodi, non ottenendo significative differenze numeriche; da un confronto con fornitori di trasloelevatori, tuttavia, è emerso come il primo metodo rispecchi maggiormente il reale comportamento del sistema retro-azionato e sia dunque da preferire (si veda figura 2.2).

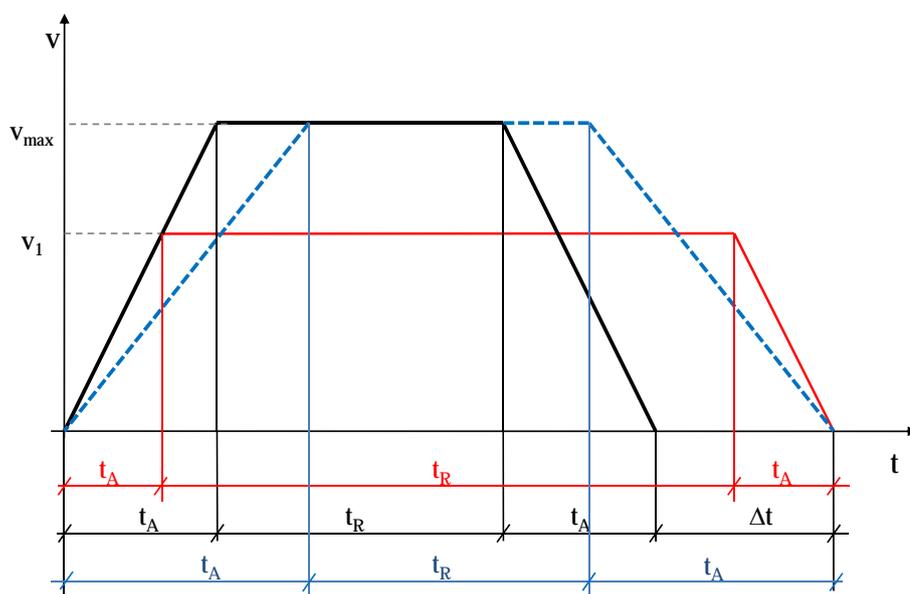


Figura 2.2. Variazione del profilo di velocità per il moto più veloce necessario per completare lo spostamento nello stesso tempo di quello più lento. In colore nero viene rappresentato il profilo di velocità originale, in colore rosso il nuovo profilo ad accelerazione costante e in blu il nuovo profilo nel caso di variazione dei valori di accelerazione

Per ogni posizione della scaffalatura il nuovo tempo di accelerazione/decelerazione, il nuovo tempo a velocità costante e la nuova velocità costante del moto più veloce possono essere ricalcolati come illustrato nel diagramma a blocchi in figura 2.3.

Le grandezze di input per il calcolo del tempo sono dunque:

- $v_{max,x}$: velocità massima nominale lungo l'asse x;
- $v_{max,y}$: velocità massima nominale lungo l'asse y;
- a_x : accelerazione nominale lungo l'asse x;
- a_y : accelerazione nominale lungo l'asse y;
- h : altezza posto pallet;
- l : larghezza posto pallet;
- nH : numero di ripiani della scaffalatura;
- nL : numero di colonne della scaffalatura.

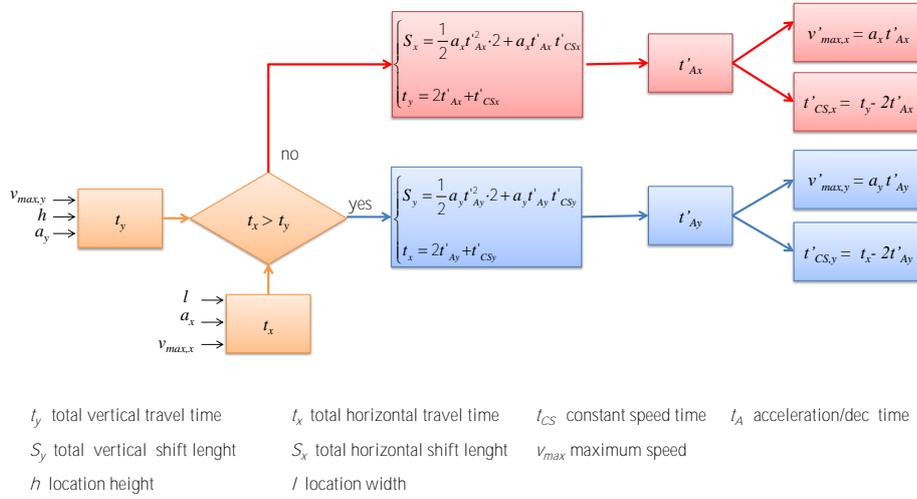


Figura 2.3. Schema a blocchi per la determinazione del nuovo tempo di accelerazione/decelerazione t'_A , del tempo a velocità costante t'_{CS} e della velocità di regime v'_{max} per il moto più veloce.

Il trasloelevatore per prelevare/stoccare l'unità di carico si deve posizionare a metà della locazione e ad una altezza che, nel presente studio, viene approssimata pari al livello inferiore della cella. Nella realtà tale altezza è di qualche centimetro superiore per consentire alle forche telescopiche di inforcare il pallet in fase di prelievo o di poter posizionare il carico in fase di immagazzinamento. Si assume inoltre che la stazione di I/O sia posta alla stessa altezza del livello inferiore delle celle del primo ripiano.

Attraverso i valori di altezza (h), lunghezza (l) del posto pallet e il numero di colonne (nL) e ripiani (nH) della scaffalatura è possibile calcolare le distanze (S_x, S_y) dalla stazione di I/O a qualunque locazione della scaffalatura. Queste distanze sono necessarie per la valutazione del profilo di velocità e per la determinazione dei tempi di viaggio. Attraverso le semplici formule del moto uniformemente accelerato si possono calcolare i tempi necessari al trasloelevatore per raggiungere ciascuna locazione partendo dalla stazione di I/O. Va precisato che le velocità massime sui due assi sono garantite sia per i viaggi a carico sia per quelli a vuoto e le accelerazioni vengono considerate costanti; di conseguenza il tempo necessario per raggiungere una determinata locazione dall'I/O è uguale al tempo necessario per ritornare all'I/O dalla medesima locazione. Per questo motivo, per una data locazione il tempo per effettuare un ciclo singolo di prelievo equivale al tempo per eseguire un ciclo singolo di stoccaggio.

2.3 Il modello per il calcolo dell'energia

Ad oggi non risultano presenti in letteratura modelli per il calcolo dei consumi energetici degli AS/RS sufficientemente dettagliati per gli scopi di questa tesi, in grado cioè di stimare le differenze di consumo tra le diverse locazioni di una scaffalatura. L'unico studio in merito è, infatti, un recentissimo articolo (Lerher et al., 2013), per la determinazione dei consumi energetici di un mini-load. In tale lavoro, per ricavare l'energia viene calcolata una potenza media relativa alla movimentazione sui tre assi valida per l'intera scaffalatura, che viene poi moltiplicata per il tempo medio di ciclo. Nel modello che si propone, invece, si è valutata puntualmente l'energia meccanica richiesta dal trasloelevatore come somma dell'energia meccanica fornita dal motore lungo l'asse x e dal motore lungo l'asse y per servire ogni singola locazione, ciascuna basata sul profilo di velocità necessario a garantire il corretto funzionamento delle macchine di ultima generazione.

L'energia meccanica fornita dai motori può essere stimata integrando nel tempo il prodotto della coppia totale e della velocità angolare all'albero motore. I motori utilizzati per la movimentazione del trasloelevatore sono asincroni trifase e sono dotati di inverter; questo fa sì che le coppie possano essere considerate costanti durante le fasi di accelerazione, facilitando così la determinazione delle energie necessarie per raggiungere ciascuna locazione della scaffalatura.

L'energia per raggiungere le varie locazioni è data dal contributo dell'energia necessaria alla fase di accelerazione, di decelerazione e di regime. Le energie, a differenza dei tempi, variano inoltre a seconda che il trasloelevatore viaggi con carico a bordo o a vuoto, in salita o in discesa; di conseguenza, le energie di prelievo e stoccaggio necessarie a servire la medesima locazione non coincidono.

Dopo aver ridefinito per ciascuna locazione le grandezze caratteristiche delle varie fasi di accelerazione, regime e decelerazione alla luce delle modifiche dei profili di velocità come riportato nel precedente paragrafo, è possibile valutare distintamente i consumi energetici per i motori che governano i movimenti sull'asse orizzontale e verticale.

Per il moto orizzontale vengono calcolate le coppie, sia a carico sia a vuoto, che il motore fornisce nelle fasi di accelerazione, di decelerazione e a regime. La coppia totale è pari alla somma della coppia necessaria a vincere gli attriti (M_{Fx}) e della coppia accelerante (M_{Ix}). Per la valutazione degli attriti, i trasloelevatori utilizzano solitamente ruote in gomma che scorrono su binario in ferro. La coppia accelerante deve invece vincere i momenti di inerzia relativi alle masse in gioco, ovvero al motore, alla struttura della macchina e all'unità di carico.

Nel moto verticale, rispetto al movimento orizzontale, per la determinazione dei valori energetici relativi alle fasi di accelerazione, decelerazione e di regime vanno valutate non solo la coppia necessaria a vincere gli attriti

(M_{Fy}) e la coppia accelerante (M_{Iy}), ma anche la coppia legata alla forza peso del carico (M_{Gy}). Inoltre, le varie coppie devono essere calcolate non solamente a vuoto o a carico ma anche a seconda che il moto sia in discesa o in salita, a causa del diverso contributo della gravità.

Nei moderni trasloelevatori è possibile installare un sistema che permette il recupero, se pur parziale, dell'energia in fase di frenata, che altrimenti verrebbe dissipata in calore. Per tenere conto di questo aspetto, si è introdotto nel modello un parametro che esprime la percentuale di recupero ipotizzabile; in tal caso l'energia recuperata in frenata viene sottratta al fabbisogno energetico complessivo dello spostamento.

I parametri necessari alla determinazione dei consumi energetici e che rappresentano gli input al modello sono:

- m : massa dell'unità di carico;
- $mass_x$: massa totale del trasloelevatore;
- $mass_y$: massa piattaforma di sollevamento;
- c_{rf} : rapporto tra coefficiente d'attrito volvente e raggio della ruota;
- f_w : attriti sollevamento (catene, ecc.);
- K_x, K_y : percentuali di recupero energetico in fase di frenata.
- n : velocità angolare motore;
- J_w : momento d'inerzia ruote, alberi, catene;
- J_r : momento d'inerzia riduttore;
- J_n : momento d'inerzia motore;
- η_t : rendimento trasmissione;
- η_r : rendimento riduttore;
- D : diametro primitivo.

Tralasciando per semplicità le formule fisiche di base che portano al calcolo di ciascuna coppia, in figura 2.4 viene proposto lo schema a blocchi del procedimento atto al calcolo dell'energia richiesta per servire una locazione. Da esso si può evincere come si compongano i contributi delle coppie nei diversi tratti dello spostamento.

Nel sottoparagrafo seguente viene riportato a titolo esemplificativo il calcolo del consumo energetico associato ad una locazione della scaffalatura.

Per l'utilizzo del modello è stato codificato un apposito programma in linguaggio C, che consente il calcolo del consumo energetico in funzione dei seguenti parametri di input richiesti dall'interfaccia utente:

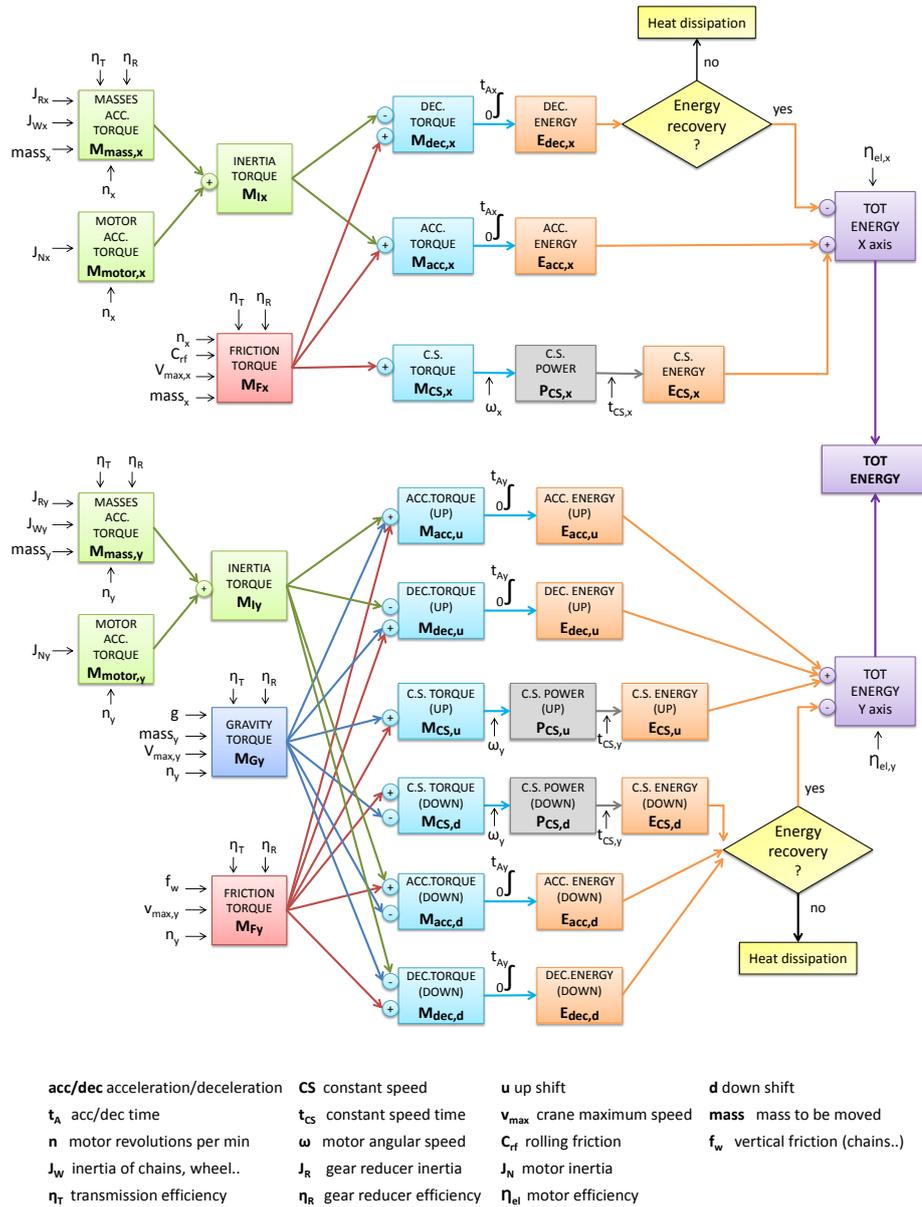


Figura 2.4. Schema a blocchi per la determinazione dell'energia.

- geometria della scaffalatura (numero ripiani e colonne e dimensioni delle locazioni);
- specifiche del trasloelevatore utilizzato (velocità, accelerazione, massa, specifiche tecniche del motore);
- eventuale recupero energetico in frenata;
- peso dell'unità di carico.

2.4 Esempio di calcolo del consumo energetico

Nel seguito, viene proposto un esempio per il calcolo dell'energia necessaria per servire una data locazione nella scaffalatura.

Vengono utilizzati gli stessi simboli e acronimi dello schema a blocchi della figura 2.4. Inoltre, i parametri sono contrassegnati dal simbolo (*) per indicare l'assenza del carico a bordo. Le relazioni fisiche per la determinazione delle coppie vengono omesse per semplicità.

Per il calcolo si sono considerate le seguenti ipotesi:

- La locazione da valutare si trova nella colonna 30 della scaffalatura e al ripiano 6.
- Le dimensioni di ciascuna locazione (posto-pallet) sono: $h = 1,4$ m ; $l = 1,2$ m.
- Il peso dell'unità di carico è di 1000 kg.
- Si è considerata una dissipazione totale dell'energia nelle fasi di frenata ($K_x = K_y = 0$).

I dati di input relativi al trasloelevatore utilizzato sono:

Asse x	$mass_x = 11500$ kg	$mass_x^* = 10500$ kg
$v_{max,x} = 4$ m/s	$a_x = 0,8$ m/s ²	$n_x = 2600$ rpm
$J_{Wx} = J_{Rx} = 0$	$J_{Nx} = 0,093$ kgm ²	$c_{rf} = 0,02$
$\eta_T = 0,85$	$\eta_R = 0,90$	$\eta_{el,x} = 0,93$

Asse y	$mass_y = 2550$ kg	$mass_y^* = 1550$ kg
$v_{max,y} = 0,9$ m/s	$a_y = 0,8$ m/s ²	$n_y = 3825$ rpm
$J_{Wy} = J_{Ry} = 0$	$J_{Ny} = 0,093$ kgm ²	$f_w = 0$
$\eta_T = 0,95$	$\eta_R = 0,90$	$\eta_{el,y} = 0,93$

Viene calcolato il nuovo profilo di velocità (si veda figura 2.3):

$$Tx = 13,85s, Ty = 8,9s$$

$$Tx > Ty \Rightarrow \text{sostituire } (t_{Ay}, t_{CS,y}, v_{max,y}) \text{ con } (t'_{Ay}, t'_{CS,y}, v'_{max,y})$$

$$t'_{Ay} = 0,66s \quad t'_{CS,y} = 12,52s \quad v'_{max,y} = 0,53m/s$$

$$t_{Ax} = 5,0s \quad t_{CS,x} = 3,85s \quad v_{max,x} = 4,0m/s$$

Ottenuti i profili di velocità è possibile calcolare il consumo energetico per i due assi in modo separato:

Asse x

$$\omega_x(n_x, t_{Ax}) = 272,27s^{-1}$$

$$M_{mass,x}(\eta_T, \eta_R, J_{Rx}, J_{Wx}, mass_x, n_x) = 176,68Nm$$

$$M_{mass,x}^*(\eta_T, \eta_R, J_{Rx}, J_{Wx}, mass_x^*, n_x) = 161,32Nm$$

$$M_{motor,x}(J_{Nx}, n_x) = M_{motor,x}^* = 5,06Nm$$

$$M_{Ix} = M_{motor,x} + M_{mass,x} = 181,74Nm$$

$$M_{Ix}^* = M_{motor,x}^* + M_{mass,x}^* = 166,38Nm$$

$$M_{Fx}(\eta_T, \eta_R, C_{rf}, v_{max,x}, mass_x, n_x) = 43,33Nm$$

$$M_{Fx}^*(\eta_T, \eta_R, C_{rf}, v_{max,x}, mass_x^*, n_x) = 39,56Nm$$

$$M_{acc,x} = M_{Fx} + M_{Ix} = 225,07Nm$$

$$M_{acc,x}^* = M_{Fx}^* + M_{Ix}^* = 205,94Nm$$

$$M_{CS,x} = M_{Fx} = 43,33Nm$$

$$M_{CS,x}^* = M_{Fx}^* = 39,56Nm$$

$$E_{acc,x} = \int_0^{t_A} M_{acc,x} \omega_x(t) dt = 153203J$$

$$E_{acc,x}^* = \int_0^{t_A} M_{acc,x}^* \omega_x(t) dt = 140180J$$

$$E_{CS,x} = P_{CS,x} t_{CS,x} = M_{CS,x} \omega_x t_{CS,x} = 45421J$$

$$E_{CS,x}^* = P_{CS,x}^* t_{CS,x} = M_{CS,x}^* \omega_x t_{CS,x} = 414711J$$

$$E_{dec,x} = E_{dec,x}^* = 0 \text{ (dissipazione)}$$

Per l'asse orizzontale le energie per il prelievo (E_{Xr}) e per lo stoccaggio (E_{Xs}) sono equivalenti essendo indipendenti dal carico, si ha dunque:

$$E_{Xr} = E_{Xs} = (E_{acc,x}^* + E_{CS,x}^* + E_{acc,x} + E_{CS,x})/\eta_{el,x} = 408898J$$

Asse y

$$\omega_y(n_y, t'_{Ay}) = 235,9s^{-1}$$

$$M_{mass,y}(\eta_T, \eta_R, J_{Ry}, J_{Wy}, mass_y, n_y) = 5,36Nm$$

$$M_{mass,y}^*(\eta_T, \eta_R, J_{Ry}, J_{Wy}, mass_y^*, n_y) = 3,26Nm$$

$$M_{motor,y}(J_{Ny}, n_y) = M_{motor,y}^* = 7,83Nm$$

$$M_{Iy} = M_{motor,y} + M_{mass,y} = 13,19Nm$$

$$M_{Iy}^* = M_{motor,y}^* + M_{mass,y}^* = 11,09Nm$$

$$M_{Fy} = M_{Fy}^* = 0$$

$$M_{Gy}(\eta_T, \eta_R, mass_y, v_{max,y}, g, n_y) = 65,74Nm$$

$$M_{Gy}^*(\eta_T, \eta_R, mass_y^*, v_{max,y}, g, n_y) = 39,96Nm$$

$$M_{acc,u} = M_{Fy} + M_{Iy} + M_{Gy} = 78,93Nm$$

$$M_{acc,u}^* = M_{Fy}^* + M_{Iy}^* + M_{Gy}^* = 51,05Nm$$

$$M_{CS,u} = M_{Fy} + M_{Gy} = 65,74Nm$$

$$M_{CS,u}^* = M_{Fy}^* + M_{Gy}^* = 39,96Nm$$

$$M_{dec,u} = M_{Fy} - M_{Iy} + M_{Gy} = 52,55Nm$$

$$M_{dec,u}^* = M_{Fy}^* - M_{Iy}^* + M_{Gy}^* = 28,87Nm$$

$$E_{acc,u} = \int_0^{t_A} M_{acc,u} \omega_y(t) dt = 6187J$$

$$E_{acc,u}^* = \int_0^{t_A} M_{acc,u}^* \omega_y(t) dt = 4002J$$

$$E_{dec,u} = \int_0^{t_A} M_{dec,u} \omega_y(t) dt = 4119J$$

$$E_{dec,u}^* = \int_0^{t_A} M_{dec,u}^* \omega_y(t) dt = 2263J$$

$$E_{CS,u} = P_{CS,u} t_{CS,y} = M_{CS,u} \omega_y t_{CS,y} = 194499J$$

$$E_{CS,u}^* = P_{CS,u}^* t_{CS,y} = M_{CS,u}^* \omega_x t_{CS,y} = 118225J$$

$$E_{acc,d} = E_{dec,d} = E_{CS,d} = E_{acc,d}^* = E_{dec,d}^* = E_{CS,d}^* = 0 \text{ (dissipazione)}$$

Per l'asse verticale l'energia necessaria per il prelievo (E_{Y_r}) è differente rispetto a quella necessaria per lo stoccaggio (E_{Y_s}) a causa dell'influenza del peso del carico, si ha dunque:

$$\begin{aligned} E_{Y_r} &= (E_{acc,u}^* + E_{CS,u}^* + E_{dec,u}^*)/\eta_{el,y} = 133860J \\ E_{Y_s} &= (E_{acc,u} + E_{CS,u} + E_{dec,u})/\eta_{el,y} = 220220J \end{aligned}$$

L'energia totale di prelievo (E_r) e di stoccaggio (E_s) vengono determinate come somma dell'energia relativa all'asse orizzontale e quella relativa all'asse verticale:

$$\begin{aligned} E_r &= E_{X_r} + E_{Y_r} = 542758J \\ E_s &= E_{X_s} + E_{Y_s} = 629118J \end{aligned}$$

Si può notare come l'energia per il prelievo non coincida, come accade per il tempo, con quella per lo stoccaggio.

2.5 Il Rack Energy Potential

Per l'analisi delle politiche di controllo, ma anche per una prima valutazione in sede di progettazione della configurazione dell'AS/RS, è possibile introdurre un indice caratteristico dei consumi energetici per una data scaffalatura.

Dall'analisi del modello esposto nel precedente paragrafo, appare evidente come il consumo energetico dipenda strettamente dalle specifiche del trasloelevatore, a sua volta legato alla geometria della scaffalatura. Come verrà meglio approfondito nei capitoli legati alla progettazione, è prassi comune tra i fornitori riferirsi ad un insieme di modelli base da adattare alle specifiche esigenze del cliente, che vengono selezionati principalmente in base alla massima altezza di stoccaggio da raggiungere. All'aumentare del numero di livelli della scaffalatura, si modifica infatti la struttura del trasloelevatore (basti pensare all'altezza della colonna) e le masse da movimentare, con relativo impatto sui consumi richiesti per i movimenti della macchina.

Risulta quindi evidente che una misura di prestazione globale, come quella ricercata, debba intendersi relativa ad una data geometria di scaffalatura con associato un opportuno trasloelevatore.

Si definisce *Rack Energy Potential* (REP) la somma dei consumi di energia richiesti per completare un ciclo singolo di stoccaggio e un ciclo singolo di prelievo per tutte le locazioni di una scaffalatura.

Se si moltiplica il REP per il turnover complessivo (domanda totale nell'orizzonte di pianificazione diviso la capacità di stoccaggio della scaffalatura), si ottiene una misura del fabbisogno di energia per servire la scaffalatura nell'orizzonte temporale considerato, qualora si adotti una politica di allocazione casuale, ovvero quando ogni unità di carico è libera di occupare una qualsivoglia locazione nella scaffalatura ed ogni locazione risulta avere la stessa probabilità di essere visitata. Se si considerano costanti la capacità di stoccaggio richiesta e la domanda di movimentazione, allora il REP può essere utilizzato per confrontare i fabbisogni di diverse geometrie della scaffalatura o tipologie di prodotto. Come si vedrà nel capitolo 3, poiché la politica di allocazione casuale non consente di allocare opportunamente i prodotti in modo da ottimizzare la prestazione richiesta, il REP può essere utilizzato per definire il limite superiore del consumo energetico, rispetto al quale possono essere confrontate politiche di controllo alternative.

Capitolo 3

Politiche di storage assignment

Negli automated storage and retrieval systems l'applicazione dei principi di sustainable logistics porta a rivederne le politiche di controllo e la progettazione del sistema stesso, tradizionalmente ottimizzate esclusivamente in ottica *time-based*. Poiché è ampiamente dimostrato in letteratura come le prestazioni dei magazzini dipendano fortemente dalla politica di allocazione dei prodotti nelle scaffalature (Petersen and Aase, 2004), in questo capitolo si vuole analizzare come si modifichi il processo di storage assignment negli AS/RS quando si adotti la nuova prospettiva *energy-based*.

Nel paragrafo 3.1 verrà analizzata la letteratura esistente sulle politiche di stoccaggio, mentre nel paragrafo 3.2 verranno esplicitate le ipotesi alla base delle analisi dei successivi paragrafi. Nel paragrafo 3.3 si definirà una nuova politica di assegnazione dedicata: la *energy-based full turnover policy*. Verrà valutato come si modificano le zone associate a ciascun prodotto e verranno confrontate le prestazioni sia temporali che energetiche della nuova politica con quelle della tradizionale *time-based full turnover policy*.

L'energia delle fasi di decelerazione del trasloelevatore può essere recuperata e reimpressa nel sistema di alimentazione, invece di essere dissipata come calore di scarto; nel paragrafo 3.4 si valuterà quindi l'impatto del recupero energetico sulle prestazioni delle politiche di assegnazione dedicata.

Un ulteriore fattore che influenza le prestazioni energetiche del sistema è il peso delle unità di carico; nel paragrafo 3.5 si analizzeranno le implicazioni del peso del prodotto sulle politiche di allocazione *energy-based*, sia per quanto concerne la forma e disposizione delle zone dedicate ai prodotti, sia per quanto riguarda le relative prestazioni energetiche. Verrà proposta, inoltre, una particolare tipologia di allocazione nella quale si stratifica la scaffalatura in fasce differenti di peso. Si confronteranno poi le prestazioni di energia per allocazioni di tipo dedicato, per classi e random per diverse curve di domanda e geometrie dei scaffalatura. Infine, con l'obiettivo di migliorare la flessibilità massimizzando l'efficienza energetica, si introdurranno

e valuteranno delle nuove politiche dinamiche di allocazione energy-based.

Parte dei risultati ottenuti nel presente capitolo sono stati presentati a convegni (Meneghetti and Monti, 2013a) e pubblicati o in corso di pubblicazione su rivista internazionale (Meneghetti and Monti, 2013c,b).

3.1 Time-based storage location assignment: review della letteratura

Il tempo di picking a magazzino influenza direttamente il livello di servizio percepito dal cliente; pertanto, tutta la letteratura sullo storage assignment si è storicamente focalizzata sull'ottimizzazione di questa prestazione, valutando e confrontando un insieme di regole atte a determinare il posizionamento delle unità di carico nelle scaffalature (de Koster et al., 2007; Gu et al., 2007, 2010).

Si individuano, a seconda del criterio di ripartizione del magazzino, due concezioni contrapposte di assegnazione dei prodotti: le logiche a posti dedicati (*dedicated storage*) e le logiche a posti condivisi (*shared storage*).

Con le prime, le locazioni vengono riservate in modo esclusivo ai prodotti per tutto l'orizzonte di pianificazione; ciò comporta che il magazzino debba essere dimensionato per una *potenzialità ricettiva* pari alla somma dei massimi delle giacenza prevista di ciascun prodotto nel medesimo orizzonte temporale.

Nelle logiche shared storage, invece, le unità di carico sono libere di occupare tutte le locazioni disponibili di una data zona: un sottoinsieme della scaffalatura viene in questo modo “condiviso” da più prodotti. Si assiste così ad una compensazione dei picchi e delle valli di giacenza dei diversi prodotti nell'orizzonte di pianificazione, con una potenzialità ricettiva richiesta pari al massimo della somme complessive delle giacenze previste per i vari periodi di programmazione in cui è scomposto l'orizzonte temporale, che risulta dunque di gran lungo inferiore a quella richiesta dalle politiche dedicate. La più diffusa politica di assegnazione condivisa è la *random policy*, secondo la quale le locazioni libere della scaffalatura vengono occupate casualmente dai prodotti da stoccare; ogni locazione ha quindi la medesima probabilità di essere visitata nell'orizzonte temporale.

Hausman et al. (1976) hanno dimostrato analiticamente che il minimo tempo di prelievo negli AS/RS si ottiene adottando la politica di allocazione dedicata *full turnover policy*, ovvero assegnando le posizioni migliori, in termini di tempo di prelievo, ai prodotti con il più alto turnover, definito come il rapporto tra la domanda di un codice e il numero di locazioni a magazzino ad esso assegnate.

La politica full turnover, se da un lato porta all'ottimizzazione della prestazione temporale, dall'altro risulta di difficile applicazione, poiché richiede una riallocazione dei prodotti ad ogni cambiamento del mix di prodotti,

della domanda di un codice o del lotto di rifornimento. Per superare tali difficoltà, Hausman et al. (1976) hanno introdotto l'allocazione per classi turnover-based, nella quale i prodotti vengono suddivisi in classi in base al loro turnover e ad ogni classe viene dedicata una determinata zona all'interno della scaffalatura. All'interno della classe di appartenenza i prodotti vengono allocati in modo casuale.

L'allocazione per classi consente di compensare più facilmente le eventuali variazioni della domanda e al contempo permette di assegnare ai prodotti più frequentemente movimentati le posizioni più vicine alla stazione di I/O. Le prestazioni di picking time dell'allocazione per classi risultano intermedie tra le politiche di allocazione random, che non ottimizzando l'allocazione portano alle peggiori prestazioni di tempo, e le politiche dedicate full turnover, avvicinandosi ad una politica piuttosto che all'altra a seconda del numero di classi considerate. Le allocazioni con tre classi producono circa l'85% del potenziali benefici ottenibili da politiche di allocazione full turnover. I risultati di Hausman et al. (1976) vengono ottenuti per scaffalature *square in time*, ovvero per le quali il tempo necessario per raggiungere l'ultima colonna della scaffalatura è uguale al tempo per raggiungere il ripiano più alto.

Bozer and White (1984) hanno sviluppato successivamente un modello temporale per scaffalature *rectangular* e stoccaggio di tipo random, introducendo il fattore di forma (*shape factor*) b definito come:

$$b = \min \left\{ \frac{t_{nH}}{t_{nL}}, \frac{t_{nL}}{t_{nH}} \right\}$$

dove t_{nH} è il viaggio dall'I/O al livello più alto mentre t_{nL} è il viaggio dall'I/O alla colonna più distante.

Per scaffalature *rectangular in time*, Eynan and Rosenblatt (1994) hanno elaborato dei modelli analitici per l'allocazione class-based, ottenendo delle zone per le differenti classi di domanda a forma di "L" o rettangolari. Dal loro studio emerge che sono preferibili configurazioni di AS/RS con scaffalature aventi *shape factor* non inferiore a 0,6 e divise in un massimo di sei zone da dedicare ad altrettante classi di prodotto. I risparmi di tempo ottenibili per una suddivisione maggiore del numero di classi sono risultati, infatti, piuttosto trascurabili. Dallo studio emerge anche come sia sconsigliabile scendere sotto al valore di 0,6 del fattore di forma, che comporta crescenti tempi di movimentazione.

Van den Berg and Gademán (1999) ha presentato un algoritmo di programmazione dinamica, a complessità polinomiale, che distribuisce i prodotti tra le classi in modo da minimizzare il tempo di viaggio medio di ciclo singolo del trasloelevatore.

Goetschalckx and Ratliff (1990) hanno invece esaminato la politica di stoccaggio basata sulla duration-of-stay (DOS) o tempo di permanenza a magazzino. Mentre il tasso di turnover è una caratteristica del prodotto, poiché tutte le unità di carico dello stesso codice hanno lo stesso tasso di

turnover, la DOS è, invece, una caratteristica della singola unità di carico, dato che le unità di carico di uno stesso prodotto permangono a scorta per un tempo diverso. Nella modalità di stoccaggio basata sulla DOS, le unità di carico con il minor valore atteso di DOS sono assegnate alle locazioni più vicine all'I/O. Nel caso di politiche per classi, queste sono determinate in base ai valori di DOS delle singole unità di carico e non ai tassi di turnover dei prodotti. Gli autori dimostrano che in ambienti deterministici le politiche basate sul DOS presentano un tempo medio di prelievo inferiore.

Kulturel et al. (1999) hanno esteso l'analisi agli ambienti stocastici, comparando attraverso simulazioni le politiche di assegnazione per classi turnover-based e DOS-based. Da questo studio emerge che le class storage policy basate sul turnover comportano migliori prestazioni temporali delle politiche basate sulla duration-of-stay; le differenze tra i due criteri di assegnazione diventano, tuttavia, trascurabili all'aumentare del numero di prodotti.

Anche se non chiaramente esplicitato, la maggior parte degli studi di letteratura adotta una location-to-product ratio (LTPR) pari a 1: ciò significa che si suppone di assegnare una sola locazione a ciascun prodotto. Gagliardi et al. (2012b) hanno recentemente dimostrato che quando $LTPR > 1$, ovvero quando vi sono più locazioni assegnate ad un determinato codice, le prestazioni della politica full turnover degradano rapidamente. Per l'allocazione per classi, quando $LTPR = 1$ le prestazioni del sistema aumentano con il numero di classi; le migliori prestazioni si ottengono, infatti, dalla politica full turnover, che può essere interpretata come una politica per classi dove il numero di quest'ultime è pari al numero dei prodotti. Questo non è più vero quando $LTPR > 1$. Il fatto di assegnare più locazioni allo stesso codice porta inevitabilmente con l'allocazione dedicata full turnover a riservare dei vani ai prodotti in modo esclusivo, anche quando quest'ultimi presentano giacenza nulla, mentre potrebbero essere più convenientemente messi a disposizione di altri codici. Gli autori dimostrano che, per $LTPR > 1$, le migliori prestazioni di tempo si possono ottenere adottando la politica *closest open location*, dove il prodotto da stoccare viene posto nella locazione libera più vicina all'I/O. Analogamente, per il prelievo viene selezionato il prodotto più vicino alla posizione corrente del trasloelevatore (*shortest leg*). Dalle simulazioni eseguite dagli autori è emerso che questa politica produce i migliori risultati qualora si adotti un'unica classe, portando ad un miglioramento medio del 15,4% del tempo di prelievo del traslo-elevatore rispetto alla politica full turnover.

3.2 Ipotesi preliminari

Per le analisi successive si sono assunte le seguenti ipotesi:

- le movimentazioni avvengono esclusivamente per unità di carico;

- tutte le locazioni hanno la stessa dimensione ($l = 1, 2; h = 1, 4$) e possono immagazzinare qualsiasi tipo di prodotto;
- vengono considerati esclusivamente cicli semplici (*single command*) di movimentazione;
- le unità di carico entranti e uscenti sono trasferite allo stesso punto di I/O;
- la frequenza di domanda (λ) di ciascun codice è nota e costante nel tempo;
- si adotta una politica di rifornimento di tipo *reorder-point* con dimensione del lotto pari all'Economic Order Quantity (EOQ), considerando un medesimo rapporto dei costi di gestione a scorta e di emissione dell'ordine per tutti i codici, in modo da evitare di introdurre fattori di disturbo legati alle diverse politiche di supply.

I parametri di input necessari ai modelli per il calcolo dei tempi e delle energie associate a ciascuna locazione, quali i valori di velocità nominale e l'accelerazione del trasloelevatore, i dati tecnici dei motori, gli spostamenti da eseguire etc., sono correlati alla forma della scaffalatura. Ne risulta che la geometria della scaffalatura influenza le prestazioni dell'AS/RS. Per questo motivo si sono selezionate, per la medesima capacità di stoccaggio, due differenti geometrie quale fattore di analisi. In particolare si sono confrontate le prestazioni di un magazzino automatizzato molto sviluppato orizzontalmente con 99 colonne e 10 livelli con uno maggiormente sviluppato verticalmente, caratterizzato da 45 colonne e 22 livelli, per un totale di 990 posizioni disponibili in entrambi i casi. Si sono considerati 100 differenti prodotti con domanda strettamente decrescente e dunque una Locations-To-Product Ratio (LTPR) pari a 9,9. Le specifiche dei trasloelevatori utilizzati per servire queste due scaffalature sono riportate in tabella 3.1.

Poiché le transazioni a magazzino in quantità e tipologia sono strettamente legate alla distribuzione della domanda dei codici prodotto, si è introdotto il tipo di distribuzione ABC della domanda come ulteriore fattore di indagine e si sono selezionati due livelli: una curva 20-50, il che significa che il 20% dei prodotti contribuisce al 50% delle movimentazioni (vedi figura 3.1), e una più pendente, la curva 20-80.

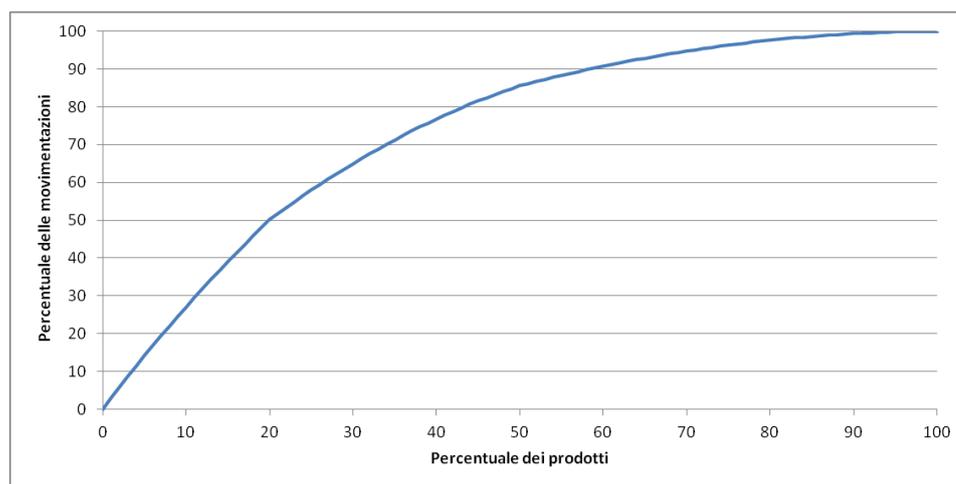
3.3 Energy-based full turnover policy

La prospettiva sostenibile mette in luce l'esigenza di promuovere l'efficienza energetica nei magazzini automatizzati e quindi a introdurre il risparmio energetico come prestazione da perseguire.

In una politica dedicata, i prodotti più frequentemente movimentati vengono assegnati alle zone più "convenienti" (John J. Bartholdi and Hackman,

Tabella 3.1. Specifiche dei trasloelevatori

Specifiche dei trasloelevatori	Scaffalatura	
	10×99	22×45
Velocità orizzontale [m/s]	4,0	3,0
Accelerazione orizzontale [m/s ²]	0,8	0,4
Velocità verticale [m/s]	0,9	0,9
Accelerazione verticale [m/s ²]	0,8	0,6
Massa trasloelevatore [kg]	10500	17100
Motore x		
Velocità [rpm]	2600	2509
Momento di inerzia [kg·m ²]	0,093	0,093
Coppia massima [N·m]	240	240
Motore y		
Velocità [rpm]	3825	2579
Momento di inerzia [kg·m ²]	0,022	0,093
Coppia massima [N·m]	191	240

**Figura 3.1.** Andamento della curva di domanda ABC 20-50

2011); tale convenienza, in un'ottica di efficienza energetica, va ora letta nel senso del minor consumo energetico per servire le locazioni interessate, anziché del minor tempo di accesso.

Si definisce quindi la *Energy-based Full Turnover Policy* (EBFT) come la strategia di stoccaggio che assegna ai prodotti ordinati in base al loro turnover in senso decrescente il minor consumo energetico per eseguire un ciclo semplice di stoccaggio più un ciclo semplice di prelievo. Come discusso nel par. 2.3, infatti, i cicli di stoccaggio e prelievo non sono simmetrici dal punto di vista energetico a causa dei differenti momenti in cui il carico è a bordo del trasloelevatore, con relativi impatti sull'inerzia e la forza peso che la coppia

fornita dal motore deve contrastare durante lo spostamento. Mentre nella *Time-based full turnover policy* (TBFT) si può parlare genericamente di tempo di viaggio o di picking time, nell'ottica energy-based vanno considerati i fabbisogni energetici di entrambe le operazioni di stoccaggio/prelievo.

Di seguito si valuterà come si modificano le zone associate a ciascun prodotto qualora si adotti la strategia EBFT (par. 3.3.1) e, attraverso prove simulate, si indagheranno le relative prestazioni sia temporali che energetiche (par. 3.3.2).

3.3.1 Distribuzione e forma delle zone dedicate ai prodotti

Nella classica allocazione temporale full-turnover i prodotti con frequenza di domanda più elevata vengono posti nelle locazioni più vicine, in termini temporali, al punto di input/output del magazzino; al contrario, i prodotti con frequenza minore vengono collocati nei vani più lontani da tale punto.

Sulla base delle ipotesi del paragrafo 3.2, la dimensione di ogni zona dedicata a ciascun prodotto è pari al suo Economic Order Quantity. Inoltre, avendo assunto costante per ogni prodotto il rapporto tra costo di giacenza e costo dell'ordine, la dimensione delle zone e la frequenza di accesso a una data posizione sono unicamente influenzata dalla distribuzione della domanda.

In base ai valori di tempo associati a ciascuna locazione tramite il modello descritto nel par. 2.2 è possibile individuare i sottoinsiemi di celle da dedicare ai vari prodotti. I prodotti aventi accesso (turnover) più elevato alle locazioni (λ/EOQ) verranno dedicati alle celle con tempo di viaggio minore.

Per valutare visivamente la disposizione dei prodotti si sono assegnati colori differenti ai 100 prodotti allocati nella scaffalatura. In figura 3.2, relativamente alla scaffalatura 22x45 e alla distribuzione di domanda 20-80, si possono notare quali locazioni siano dedicate ai primi 5 prodotti in ordine decrescente di turnover. Questi vanno ad occupare delle aree rettangolari o a forma di "L" come riscontrato in letteratura (vedi Hausman et al. (1976)).

Nella nuova allocazione energy-based full turnover, i prodotti con frequenza di domanda più elevata vengono posti nelle locazioni aventi consumo energetico associato minore. Per il calcolo del consumo energetico associato a ciascuna cella si è utilizzato il modello e il relativo programma in linguaggio C descritto nel paragrafo 2.3, assumendo unità di carico di 1000 kg.

Mantenendo gli stessi colori per i vari prodotti dell'allocazione TBFT, si possono valutare visivamente le disposizioni dei prodotti nella scaffalatura con la modalità di allocazione EBFT e confrontarli con la tradizionale modalità basata sul tempo (vedi figura 3.2). Si può notare come la forma delle zone dedicate ai prodotti si modifichi dalla tradizionale rettangolare o L-shaped propria dell'allocazione TBFT a quella a gradini per la nuova allocazione EBFT basata sull'energia.

Si ottiene, inoltre, uno slittamento verso l'alto delle zone dedicate ai prodotti, come si può notare in fig. 3.2 per i prodotti con turnover più elevato;

ciò può essere principalmente imputato allo sfruttamento della gravità in discesa, che rende gratuito lo spostamento lungo l'asse verticale, facendolo preferire a più lunghe traslazioni lungo l'asse orizzontale, come avviene invece nella allocazione TBFT.

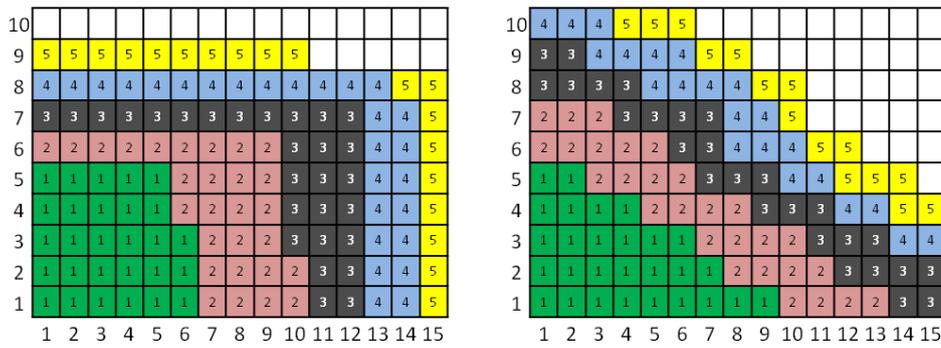


Figura 3.2. Allocazione TBFT (a sinistra) e EBFT (a destra) per i 5 prodotti con tasso di turnover più alto. Rappresentazione delle prime 15 colonne e 10 ripiani della scaffalatura 22x45.

3.3.2 Analisi delle prestazioni

Con lo scopo di analizzare le prestazioni della politica di allocazione energy-based full turnover, si sono compiute delle simulazioni su 5 finestre temporali, ciascuna caratterizzata da 53090 operazioni di prelievo e relativi riordini.

L'interesse è focalizzato sulle prestazioni energetiche, ma non si può trascurare l'importanza delle prestazioni di tempo per il loro legame diretto con il livello di servizio percepito dai clienti. Pertanto, sono stati calcolati i tempi, oltre che il fabbisogno di energia, per ogni ciclo di simulazione, al fine di valutare il potenziale trade-off tra le prestazioni di tempo e quelle energetiche.

L'analisi è stata condotta considerando, oltre alle due differenti politiche di allocazione dedicata (TBFT e EBFT), due ulteriori fattori principali: la geometria della scaffalatura (10x99 e 22x45) e la curva di domanda (20-50 e 20-80).

I risultati ottenuti sono visibili in tabella 3.2, dove vengono rappresentate le prestazioni di tempo ed energia per le due differenti ottiche di allocazione e le relative differenze percentuali. Dall'analisi della tabella emerge che i miglioramenti ottenibili sull'energia da parte della EBFT comportano un peggioramento percentuale del tempo (aumento del tempo di picking) della stessa entità del risparmio energetico ottenuto.

Le aziende si trovano dunque a gestire un trade-off, che può essere correttamente superato stabilendo quale prestazione (riduzione del tempo o ri-

sparmio energetico) porti ad un maggiore vantaggio competitivo all'impresa, al fine di applicare la politica di assegnazione più corretta.

Tabella 3.2. Performance di tempo e di energia dell'allocazione time-based full turnover (TB) e dell'allocazione energy-based full turnover (EB)

Scaf	Curva	Tempo		Energia		Δ_{rel}	Δ_{rel}
		TB [h]	EB [h]	TB [MJ]	EB [MJ]	Tempo	Energia
10×99	20-50	1019,7	1033,9	59036,8	58340,8	-1,39%	1,17%
	20-80	949,7	970,7	55801,9	54878,5	-2,21%	1,65%
22×45	20-50	1136,8	1164,4	59779,6	58194,4	-2,43%	2,65%
	20-80	1084,1	1123,5	57057,6	54779,4	-3,63%	3,99%

Ulteriori considerazioni emergono eseguendo un'analisi fattoriale degli esperimenti del tipo 2³. I fattori considerati sono: la forma della scaffalatura (99x10 come livello basso, 22x45 come livello alto), la curva di domanda ABC (20-50 come livello basso, 20-80 come livello alto) e la politica dedicata applicata (TBFT come livello basso, EBFT come livello alto).

Gli effetti principali, contrassegnati con 'S' per indicare la scaffalatura, 'C' per la curva di domanda e 'A' per il tipo di allocazione, e gli effetti di interazione tra i fattori sono riportati in figura 3.3. Tali effetti sono espressi come percentuale relativa rispetto alla media delle soluzioni ottenibili dalle varie combinazioni dei fattori. Un valore percentuale positivo indica un miglioramento delle prestazioni (risparmio), ovvero la diminuzione dei tempi o dei consumi energetici.

Dalla figura 3.3 si può notare come il fattore di maggior impatto sulle prestazioni di tempo risulti essere la geometria della scaffalatura. Adottare una scaffalatura 22x45 rispetto ad una 10x99 comporta delle perdite temporali che, rispetto alla media delle combinazioni dei vari fattori, si attestano al 12,5%. Questo è dovuto alle differenti prestazioni dei trasloelevatori utilizzati per servire le due scaffalature. Nei magazzini più bassi la massa del trasloelevatore risulta minore, ne consegue la possibilità di utilizzare motori che garantiscono prestazioni di velocità di traslazione ed accelerazione maggiori (vedi tabella 3.1) con conseguenti minori tempi di spostamento.

Se dal punto di vista temporale si nota un divario prestazionale tra le scaffalature, ciò non accade dal punto di vista energetico. In quest'ottica le due scaffalature possono ritenersi sostanzialmente equivalenti (vedi figura 3.3). Tale conclusione viene confermata anche dal calcolo dei REP legati alle due scaffalature (si veda par. 2.5), i cui valori si discostano solamente dello 0,24%. Le minori performance di velocità e accelerazione di traslazione, i minori percorsi orizzontali e il maggior sfruttamento dell'effetto positivo della gravità in fase di discesa (consumo energetico nullo in assenza di apparecchi di recupero), propri della scaffalatura maggiormente sviluppata in verticale, compensano i maggiori consumi energetici necessari per movimentare i carichi a livelli più alti.

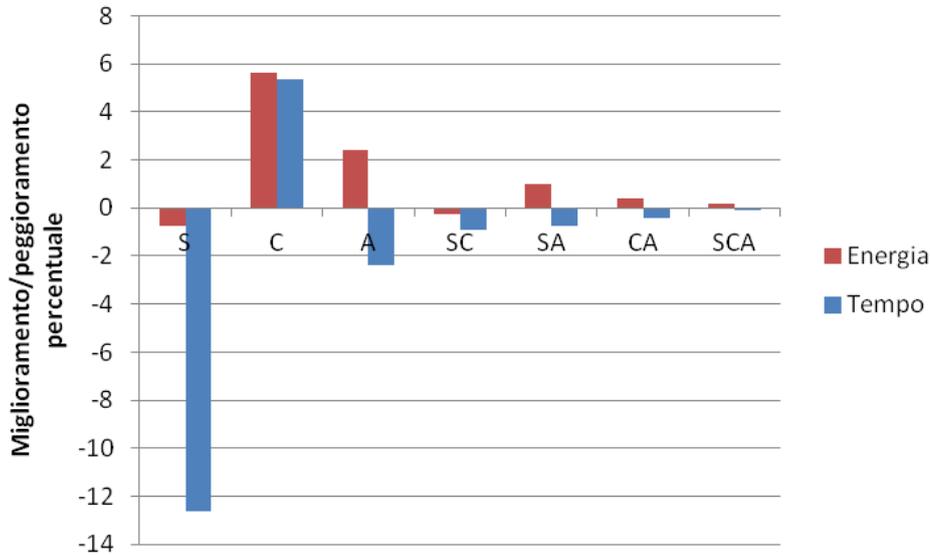


Figura 3.3. Effetti principali e di interazione dei fattori geometria della scaffalatura (S, da 10x99 a 22x45), distribuzione di domanda (C, da 20-50 a 20-80) e politica di allocazione (A, da TBFT a EBFT) per tempo (in blu) ed energia (in rosso).

Dall'analisi fattoriale emerge che, per entrambe le prestazioni, un fattore molto influente risulta essere la distribuzione di domanda. Le prestazioni legate ad una distribuzione di domanda ABC 20-80 risultano migliori di circa il 5% sia per il tempo che per l'energia rispetto ad una distribuzione 20-50. Una curva più ripida consente dunque di capitalizzare maggiormente sui benefici legati alle politiche di stoccaggio dedicate, che intrinsecamente premiano i prodotti più frequentemente movimentati (la classe A) con le posizioni migliori per la prestazione da ottimizzare. Dal punto di vista applicativo, ciò si traduce nell'opportunità di distribuire i prodotti tra le scaffalature di un AS/RS in modo da ottenere curve il più possibile ripide.

Per quanto concerne l'effetto della politica full turnover selezionata, si conferma quanto già evinto dall'analisi della tabella 3.2: passando dalla politica TBFT alla EBFT si ottiene un aumento del tempo di picking della stessa entità del risparmio energetico conseguito, che risulta di poco superiore al 2%.

L'effetto di interazione tra i fattori risulta trascurabile, essendo le percentuali di risparmio inferiori all'1%.

Per concludere l'analisi sulle prestazioni della nuova politica EBFT proposta, si sono confrontati i valori di consumo energetico ottenibili adottando l'allocazione random e l'allocazione energy based full turnover. Moltiplicando il REP per il turnover complessivo (domanda totale divisa per capacità della scaffalatura), si ottiene una misura del fabbisogno di energia, per un dato orizzonte temporale, con allocazione casuale (ogni locazione ha la stessa

probabilità di essere visitata). In questo modo è possibile stimare le percentuali di miglioramento energetico ottenibili da un'allocazione dedicata energy based rispetto all'allocazione casuale; queste percentuali si possono osservare in tabella 3.3. Come si può notare, significativi vantaggi energetici, dell'ordine del 14%-19%, sono ottenibili adottando la strategia di allocazione EBFT proposta, rispetto alla comune allocazione casuale. Anche la prestazione di tempo risulta significativamente migliorata; poiché il tempo è infatti legato all'energia tramite la potenza, un'ottimizzazione di quest'ultima comporta comunque un drastico miglioramento anche sul tempo rispetto a quanto ottenibile rinunciando ad una qualsivoglia forma di ottimizzazione, come avviene con l'allocazione casuale.

Tabella 3.3. Prestazioni relative ad un'allocazione EBFT rispetto ad un'allocazione casuale

Scaff.	Curva di domanda	Tempo [h]		Energia [MJ]		$\Delta\%$	$\Delta\%$
		Random	EBFT	Random	EBFT	Tempo	Energia
10×99	20-50	1195,9	1033,9	67837,2	58340,8	13,55%	13,99%
	20-80	1195,9	970,7	67837,2	54878,5	18,83%	19,10%
22×45	20-50	1283,5	1164,4	67676,3	58194,4	9,28%	14,01%
	20-80	1283,5	1123,5	67676,3	54779,4	12,47%	19,06%

3.4 L'impatto del recupero energetico

I produttori di trasloelevatori di nuova generazione offrono l'opzione di dotare la macchina di un sistema di recupero energetico, capace di ridurre la dissipazione in calore reimmettendo l'energia nel circuito di alimentazione ogni qualvolta la coppia motrice diventi negativa. Risulta dunque opportuno valutare come tale opzione tecnologica influenzi le politiche di controllo dei sistemi AS/RS.

In particolare, il consumo energetico netto per servire una locazione varierà in base all'entità del recupero possibile; è ipotizzabile che in una allocazione dedicata energy-based le locazioni più in alto diventino maggiormente appetibili potendo contare su maggiori quantitativi di energia recuperabile durante la fase di discesa. Quindi, la prima domanda a cui rispondere è se e come il recupero di energia possa cambiare la forma delle zone dedicate ai vari prodotti nell'allocazione EBFT rispetto alle zone della tradizionale TBFT e della stessa EBFT con dissipazione totale in fase di frenata. Il secondo interrogativo è quanto risparmio energetico possa essere ottenuto con la strategia EBFT associata con il recupero di energia, in confronto alla stessa politica di stoccaggio con totale dissipazione, alla diffusa allocazione random e alla TBFT.

Nel modello energetico proposto nel par. 2.3 sono stati previsti due coefficienti K_x e K_y moltiplicativi dell'energia nelle frasi di frenata, che rap-

presentano il valore percentuale di recupero ottenibile rispettivamente per l'asse orizzontale e per quello verticale. In questo studio, si è considerata la possibilità di ottenere un recupero di energia nella sola fase di discesa del trasloelevatore. In accordo con i produttori di questi sistemi, abbiamo stimato una percentuale ragionevole di recupero pari al 26% dell'energia altrimenti dissipata.

Nel par. 3.4.1 si analizzerà l'impatto del recupero energetico quando si adotti una allocazione condivisa (random), mentre nel par. 3.4.2 si analizzeranno le forme delle zone dedicate ai prodotti con la EBFT; nel par. 3.4.3 verranno infine analizzate le performance dell'allocazione EBFT in presenza di recupero nella fase di frenata.

3.4.1 Allocazione condivisa

Per valutare il miglioramento di prestazioni ottenibile adottando trasloelevatori con recupero energetico in presenza di allocazione condivisa, è stato calcolato il valore dei REP per le due scaffalature a sviluppo orizzontale (99 colonne e 10 livelli) e a sviluppo verticale (45 colonne e 22 livelli) già introdotte precedentemente. Come discusso nel par. 2.5, infatti, a parità di domanda dei prodotti e capacità di stoccaggio della scaffalatura, il REP risulta essere direttamente proporzionale al consumo energetico richiesto quando ogni locazione abbia la stessa probabilità di essere servita.

In tabella 3.4 sono riportati i valori di REP per le 2 scaffalature con o senza recupero di energia e le relative percentuali di risparmio energetico. I valori di REP sono calcolati per tre differenti pesi delle unità di carico: 1000 kg, 600 kg e 200 kg, in modo da poter meglio valutare l'effetto della forza peso.

Tabella 3.4. Rack Energy Potentials

Scaffalatura	Peso u.d.c. [kg]	REP [MJ]		Δ_{rel}
		dissipazione	recupero	
10×99	1000	1265	1189	6,03%
22×45	1000	1262	1089	13,76%
10×99	600	1219	1150	5,65%
22×45	600	1189	1033	13,15%
10×99	200	1173	1112	5,23%
22×45	200	1115	976	12,46%

Dalla tabella 3.4 è possibile notare come il risparmio di energia percentuale ottenibile dall'adozione di sistemi di recupero sia più marcato per scaffalature maggiormente sviluppate verticalmente. Esse infatti consentono, grazie all'altezza della scaffalatura, di generare maggiore energia nella fase di discesa, che può essere recuperata. Il risparmio percentuale, per unità di carico di 1000 kg, risulta essere infatti pari al 13,76% per la scaffalatura

22x45 e del solo 6,03% per la 10x99. L'andamento divergente tra le due scaffalature è apprezzabile in figura 3.4, dove vengono rappresentati i valori di risparmio energetico percentuale ottenibili al variare del parametro K_y , ovvero al variare della percentuale di energia recuperata rispetto a quella altrimenti dissipata nella fase di discesa del trasloelevatore.

Il peso del carico influisce sul quantitativo di energia che può essere recuperata; i valori di risparmio energetico più elevati si ottengono, infatti, a parità di scaffalatura, per i carichi più pesanti grazie al maggior contributo della forza peso.

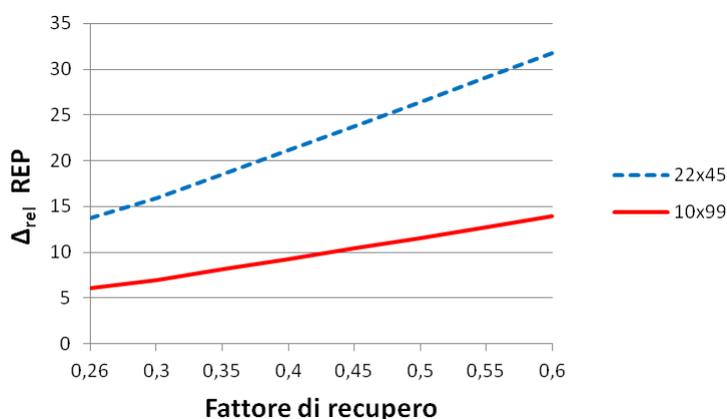


Figura 3.4. Percentuale relativa di decremento del Rack Energy Potentials per differenti fattori di recupero energetico

Si può dunque concludere che i benefici legati alla capacità degli AS/RS di sfruttare maggiormente lo spazio in altezza rispetto ai magazzini meccanizzati possono essere ulteriormente amplificati dal punto di vista dell'efficienza energetica adottando trasloelevatori con recupero energetico in fase di frenata.

3.4.2 Forma delle zone dedicate ai prodotti

Si sono analizzate la distribuzione e la forma delle zone dedicate ai prodotti qualora si adotti una politica di stoccaggio EBFT in AS/RS con sistema di recupero energetico. I risultati ottenuti per la scaffalatura 22×45 vengono riportati in figura 3.5.

Si può notare come l'andamento a gradino riscontrato per i sistemi con dissipazione totale venga preservato anche in presenza di recupero energetico; si può dunque concludere che questo andamento rappresenti una peculiarità propria dell'allocatione energy-based. Rispetto all'allocatione EBFT con dissipazione, le locazioni dedicate ai prodotti in presenza di recupero traslano verso l'alto, in modo da beneficiare della maggiore energia potenziale convertibile in energia cinetica recuperabile.

Le zone si distribuiscono diversamente al variare del carico da stoccare; in fig. 3.6 si può notare come i prodotti più leggeri tendano a compensare il minor peso occupando posizioni più elevate, in modo da aumentare la propria energia potenziale, che verrà successivamente parzialmente recuperata.

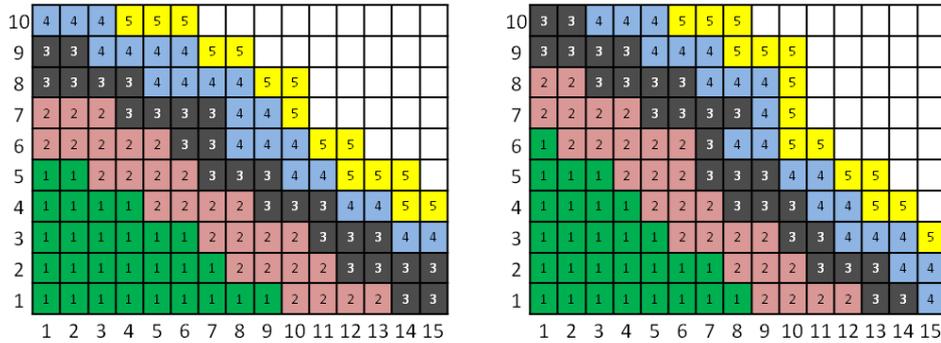


Figura 3.5. Distribuzione delle zone dedicate ai primi 5 prodotti nella scaffalatura 22×45 con politica EBFT in assenza (sinistra) o presenza (destra) di recupero energetico

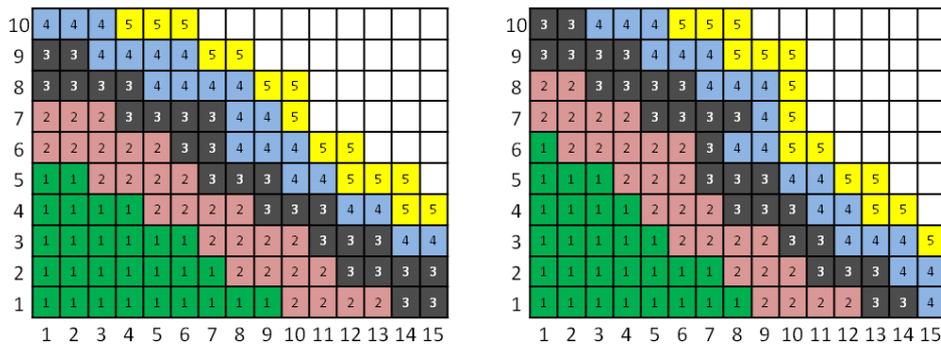


Figura 3.6. Distribuzione delle zone dedicate ai primi 5 prodotti nella scaffalatura 22×45 con politica EBFT e recupero energetico per u.d.c. di 1000 kg (sinistra) e 600 kg (destra)

3.4.3 Prestazioni delle politiche di stoccaggio dedicate

Effettuando una campagna di simulazioni del tutto analoga a quella presentata nel par. 3.3.2 è stato possibile analizzare l'effetto dell'adozione di sistemi di recupero energetico in presenza di politiche di stoccaggio dedicate di tipo full turnover (TBFT e EBFT) sui fabbisogni di tempo ed energia necessari per soddisfare le transazioni richieste.

Tabella 3.5. Performance di tempo e di energia dell'allocazione time-based full turnover (TB) e dell'allocazione energy-based full turnover (EB) in presenza di recupero energetico

Scaf	Curva	Tempo		Energia		Δ_{rel}	Δ_{rel}
		TB [h]	EB [h]	TB [MJ]	EB [MJ]	Tempo	Energia
10×99	20-50	1019,7	1028,6	54982,9	54552,1	-0,87%	0,78%
	20-80	949,7	962,5	51744,2	51202,1	-1,35%	1,05%
22×45	20-50	1136,8	1176,2	52196,5	50220,2	-3,47%	3,79%
	20-80	1084,1	1143,6	50121,7	47289,6	-5,48%	5,65%

I risultati ottenuti sono riassunti in tabella 3.5; essi possono essere confrontati con quelli registrati per sistemi a dissipazione totale riportati in tabella 3.2.

Confrontando le due tabelle, si può notare come, in presenza di recupero energetico, l'allocazione basata sul tempo porti, rispetto alla stessa allocazione in assenza di recupero energetico, dei notevoli risparmi percentuali di energia (12,7% per la scaffalatura 22×45 e curva 20-50). Ciò significa che utilizzare sistemi di recupero dell'energia può innescare approcci ibridi, come un buon compromesso tra le prestazioni di tempo e energia, allocando i prodotti in base al tempo al fine di ottimizzare il livello di servizio, e perseguendo l'efficienza energetica grazie a strumenti di recupero di energia.

La tabella 3.6 permette di analizzare l'effetto di un cambiamento radicale di prospettiva, dal tradizionale approccio basato sul tempo associato all'assegnazione time based con completa dissipazione, alla prospettiva sostenibile di assegnazione basata sull'energia e l'utilizzo di un sistema di recupero energetico. In questo caso, i risparmi energetici risultano significativamente più alti rispetto al peggioramento della prestazione tempo, raggiungendo il 16% di risparmio energetico per la scaffalatura 22×45 e la curva 20-50 contro un peggioramento dei tempi di movimentazione del 3,5%.

Tabella 3.6. Variazioni percentuali di tempo e di energia nel passaggio dall'allocazione TBFT senza recupero energetico ad un'allocazione EBFT con recupero energetico

Scaf.	Curva di domanda	$\Delta\%$	$\Delta\%$
		Tempo	Energia
10×99	20-50	-0,87%	7,60%
	20-80	-1,35%	8,24%
22×45	20-50	-3,47%	15,99%
	20-80	-5,48%	17,12%

Un quadro più chiaro sul recupero energetico può essere ottenuto eseguendo un'analisi fattoriale degli esperimenti 2^3 . I fattori considerati e i livelli dei fattori sono gli stessi considerati nel paragrafo 3.3.2. Gli effet-

ti principali e le interazioni tra i fattori sono riportati in figura 3.7 come percentuali relative rispetto alla media delle varie soluzioni.

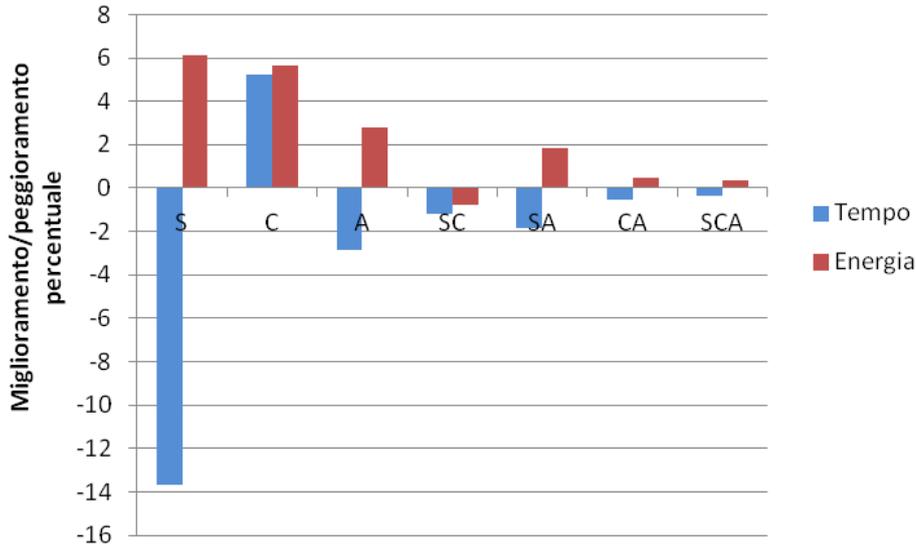


Figura 3.7. Effetti principali e di interazione dei fattori geometria della scaffalatura (S, da 10x99 a 22x45), distribuzione di domanda (C, da 20-50 a 20-80) e politica di allocazione (A, da TBFT a EBFT) per tempo (in blu) ed energia (in rosso).

Dalla figura si può notare come, nel passaggio dei fattori dal loro livello basso al livello alto, gli effetti sul tempo siano simili a quelli ottenuti nell'ipotesi di dissipazione totale dell'energia in frenata. Infatti, il recupero energetico non influisce direttamente sul tempo richiesto per raggiungere una locazione, bensì sull'assegnazione delle locazioni migliori ai prodotti, che differisce rispetto al caso di dissipazione totale. Per questo motivo l'interazione tra i fattori S (scaffalatura) e A (allocazione) risulta maggiore in presenza di recupero energetico, raggiungendo una percentuale negativa di quasi il 2%. Anche il fattore principale S raggiunge in caso di recupero un effetto maggiore rispetto alla pura dissipazione, pari a -13,6%.

Se per il tempo l'analisi fattoriale si può ritenere sostanzialmente simile a quella condotta in assenza di recupero energetico, per l'energia questo non accade.

Si può notare come la geometria della scaffalatura diventi il fattore principale in presenza di recupero energetico (6.15%), superando la distribuzione di domanda (5,6%) che, come visto nel par. 3.3.2, in assenza di sistemi di recupero rappresentava il fattore più incidente sulle prestazioni energetiche dell'AS/RS. L'effetto della geometria della scaffalatura, il cui maggiore sviluppo verticale consente di sfruttare maggiori energie potenziali, viene ulteriormente rafforzato dall'adozione di una politica di allocazione energy based, come dimostrato dal non trascurabile effetto di interazione.

Dal punto di vista progettuale, i risultati suggeriscono come sia opportuna l'adozione di sistemi di recupero energetico, soprattutto quando si selezionino AS/RS a significativo sviluppo verticale.

La distribuzione di domanda, anche se non rappresenta il principale fattore di influenza, possiede comunque un impatto importante sulle prestazioni energetiche del sistema e pertanto è opportuno distribuire i prodotti all'interno delle varie scaffalature del sistema in modo tale da ottenere curve di domanda le più ripide possibile.

Va infine sottolineato che, in presenza di recupero energetico, il comportamento delle politiche di allocazione dedicata rafforzano i notevoli vantaggi visti nei paragrafi precedenti rispetto all'allocazione casuale. Per una politica dedicata basata sull'energia, il miglioramento energetico rispetto alla politica random risulta, per la scaffalatura 22×45 , del 22% per la curva 20-50 e del 26% per la curva 20-80.

3.5 Sistemi con unità di carico a peso multiplo

In questo paragrafo si valuterà un'altra caratteristica del prodotto, oltre al suo turnover: il peso dell'unità di carico da stoccare/prelevare.

Il peso è sempre stato trascurato nella tradizionale prospettiva volta all'ottimizzazione temporale, in quanto non influenza le velocità nominali e le accelerazioni del trasloelevatore e di conseguenza il tempo di ciclo. In letteratura, dunque, il peso è stato preso in considerazione nel processo di allocazione solo per valutare la stabilità delle pile nel sistema di immagazzinamento a catasta, posizionando i prodotti pesanti nella parte inferiore (de Koster et al., 2007).

Dall'analisi del modello proposto nel par. 2.3, si evince facilmente come il peso del carico influenzi invece l'entità delle coppie motore nei vari tratti dello spostamento richiesto al trasloelevatore e meriti quindi un'analisi.

Nei prossimi paragrafi si intende dunque analizzare come il processo di allocazione debba essere modificato quando il risparmio energetico diventi la prestazione principale da perseguire e prodotti con differenti pesi debbano essere gestiti all'interno della stessa scaffalatura.

Ci si chiede: qual è il ruolo del peso del carico nel processo di allocazione energy based? Ed inoltre, dato che il tempo non è influenzato dal peso dell'unità di carico, qual è il divario tra le prestazioni time-based e energy-based in presenza di prodotti di peso differente?

Per rispondere alla prima domanda nel paragrafo 3.5.1 si valuterà come cambiano le zone dedicate ai vari prodotti per l'allocazione energy-based full turnover in funzione del peso delle unità di carico. Si introdurrà una nuova declinazione dell'allocazione EBFT, che sfrutta le diverse classi di peso per introdurre una stratificazione della scaffalatura dal basso verso l'alto.

Per rispondere al secondo quesito, nel paragrafo 3.5.2, attraverso la simulazione, si confronteranno le prestazioni di tempo e di energia per differenti tipologie di allocazione, nell'ipotesi di avere unità di carico con peso differente all'interno della medesima scaffalatura.

3.5.1 Effetto dei pesi multipli sulle zone dedicate ai prodotti

Nell'analisi si considera la scaffalatura con 45 colonne e 22 livelli; questa geometria è stata scelta, in quanto il suo sviluppo verticale consente di studiare meglio l'impatto della gravità sulla forma delle zone dedicate ai prodotti. Essa è caratterizzata, inoltre, da un fattore di forma pari a 0,74, appartenente all'intervallo [0,6..1] che garantisce (Eynan and Rosenblatt, 1994) prestazioni di tempo relativamente costanti al cambiare della distribuzione della domanda e del numero di classi.

Si assumono le ipotesi elencate nel paragrafo 3.2; si introducono quindi tre classi di peso dei prodotti, che sono stati quindi suddivisi in leggeri (200 kg), medi (600 kg) e pesanti (1000 kg), equamente distribuiti all'interno delle classi ABC delle curve di domanda analizzate e occupanti circa il medesimo numero totale di locazioni nella scaffalatura.

Nel caso di mono-peso (in questo studio supposto di 600 kg, pari a quello della categoria dei carichi medi), come si è visto nel par. 3.3.1, passando da un'allocazione full turnover time-based ad una energy-based, la forma delle zone dedicate ai vari prodotti passa dalla tradizionale forma rettangolare o a "L" (Hausman et al., 1976) riportata in figura 3.8 per carichi da 600 kg ad un andamento a gradino (figura 3.9 per u.d.c. da 600 kg).

Introducendo unità di carico con differenti pesi è necessario calcolare i valori di energia associati a ciascuna cella per ogni fascia di peso, al fine di poter individuare quali locazioni risultano a consumo energetico minore, a seconda del peso del prodotto a cui si devono attribuire le locazioni della scaffalatura.

Le locazioni riservate ai prodotti variano come riportato nell'esempio di figura 3.10. Un prodotto pesante tende ad occupare posizioni inferiori rispetto a quelle che occuperebbe nell'ipotesi di singolo peso (dalle posizioni 1, 2, 3 a 1', 2', 3' in figura 3.10), cosiccome un prodotto leggero tende ad occupare posizioni più elevate, dalla posizione 4 a 4' nella figura 3.10), compensando il minor peso con una maggiore altezza dal suolo.

Risulta dunque che per l'allocazione EBFT, le zone dedicate ai vari prodotti differiscono a seconda che si gestiscano pesi singoli o pesi multipli all'interno della stessa scaffalatura.

Stratified energy-based location assignment

Viene proposto l'inserimento di un nuovo parametro per l'assegnazione di un prodotto alle locazioni della scaffalatura: il peso dell'unità di carico. Viene

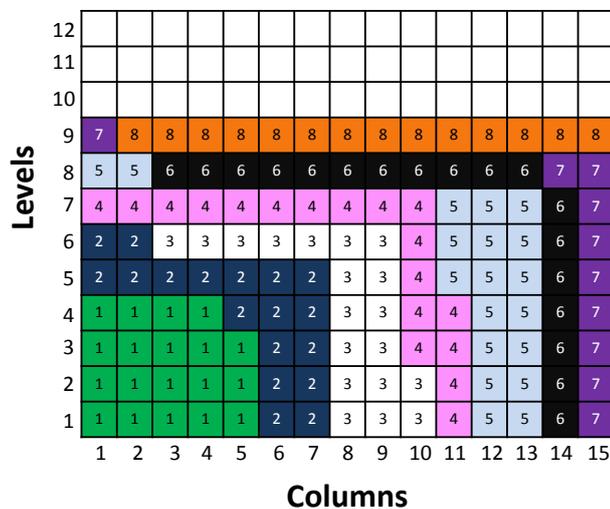


Figura 3.8. Time-based full turnover location assignment per i primi 8 prodotti a peso singolo (600 kg) per la curva di domanda 20-50. Rappresentazione delle prime 15 colonne e 12 ripiani della scaffalatura 22x45.

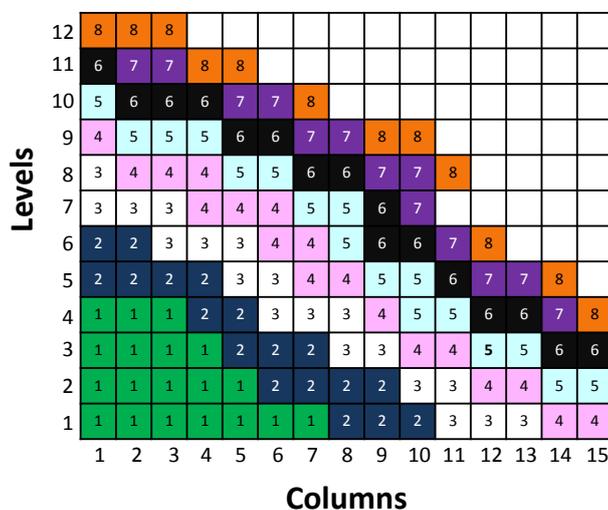


Figura 3.9. Energy-based full turnover location assignment per i primi 8 prodotti a peso singolo (600 kg) per la curva di domanda 20-50. Rappresentazione delle prime 15 colonne e 12 ripiani della scaffalatura 22x45.

dunque introdotta una nuova politica full turnover chiamata *stratificata*.

Essa consiste nello stratificare la scaffalatura in tante fasce orizzontali

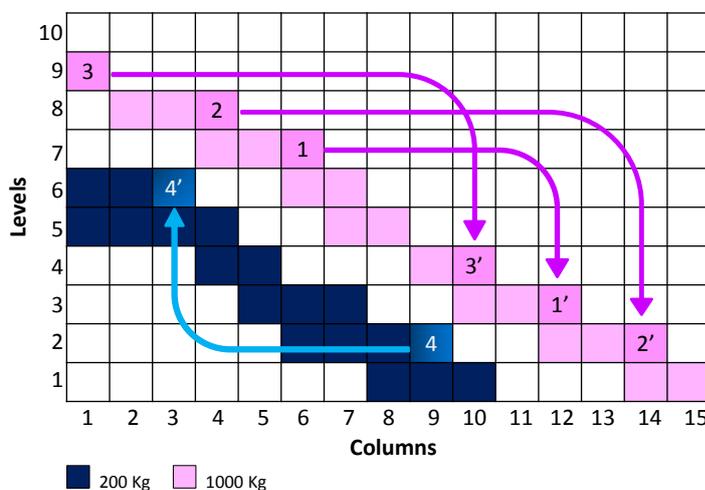


Figura 3.10. Allocazione energy-based full turnover (scaffalatura 22x45 e curva di domanda 20-50) per i prodotti più leggeri (colore blu) e prodotti più pesanti (colore rosa).

quante le classi di peso dei prodotti, vincolando gli elementi più pesanti ad occupare gli strati più bassi, dedicando via via in ordine decrescente dal basso verso l'alto i livelli più alti agli elementi leggeri. Gli articoli sono sempre ordinati in base al turnover, ma ciascuno di essi viene assegnato alle migliori posizioni disponibili solo all'interno della fascia dedicata alla propria classe di peso.

L'idea di stratificare la scaffalatura è nata dal confronto con alcuni produttori di scaffalature, da cui è emerso che il posizionare i carichi pesanti nei livelli più bassi e quelli più leggeri in quelli più alti potrebbe consentire la diminuzione della sezione trasversale degli elementi portanti della scaffalatura, riducendo così i costi di investimento, oltre a portare benefici per la sicurezza anti-sismica. Si tratta di un'opportunità molto interessante, che richiede la definizione di adeguate politiche di controllo, che rendano questa opzione progettuale effettivamente praticabile.

Con l'allocazione di tipo stratificato (*stratified energy-based location assignment*), la forma delle zone dedicate ai vari prodotti in ottica energy-based rimane sempre a gradino all'interno di ogni strato relativo alla classe di peso, come illustrato in figura 3.11.

3.5.2 Effetto delle politiche di allocazione sul consumo energetico

Una prima possibile analisi per valutare l'effetto del peso dell'unità di carico sul consumo di energia è la valutazione del valore del REP, che consente la

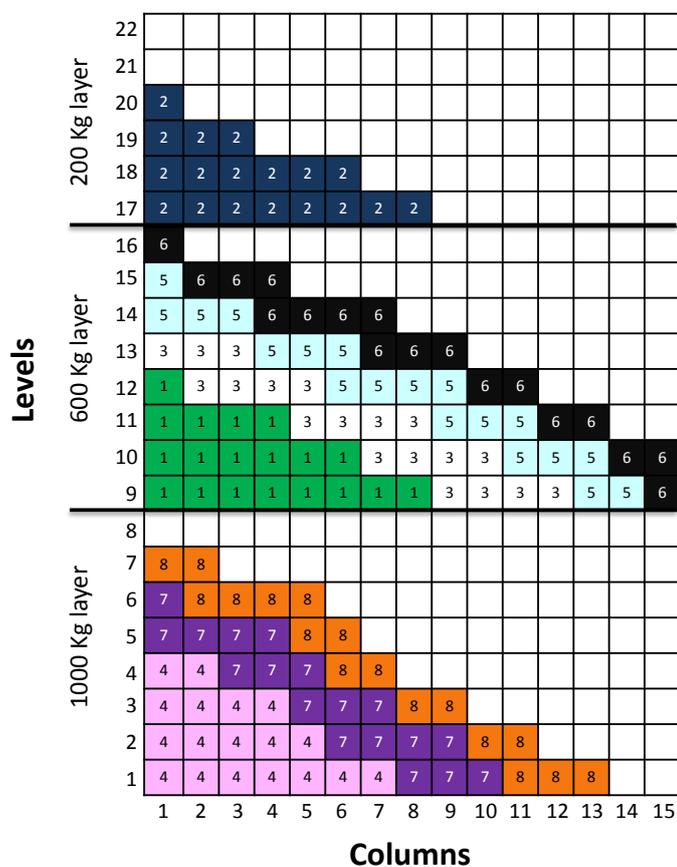


Figura 3.11. Stratified energy-based location assignment per i primi 8 prodotti con pesi multipli. Rappresentazione delle prime 15 colonne della scaffalatura (scaffalatura 22x45 e curva 20-50).

valutazione delle prestazioni della *random allocation*. Nell'ipotesi di avere tutti prodotti con ugual peso, il calcolo del REP avviene come spiegato nel paragrafo 2.5.

Per ottenere una misura delle prestazioni globali per un sistema di immagazzinamento caratterizzato da differenti pesi dei prodotti, senza conoscere in anticipo il prodotto che occuperà ogni locazione come caratteristico delle allocazioni condivise, è necessario introdurre il valore atteso del consumo di energia per ciascuna locazione. Il valore atteso viene calcolato moltiplicando il consumo energetico per servire una locazione con un dato peso del carico per la probabilità che il prodotto appartenga alla classe di peso considerata.

Moltiplicando poi il REP per il turnover complessivo (domanda totale divisa per capacità della scaffalatura), si ottiene una misura del fabbisogno di energia, per un dato orizzonte temporale, con allocazione casuale, che

Tabella 3.7. Rack energy potentials (REP) per differenti classi di peso.

Peso delle unità di carico [kg]	REP [GJ]	
	22x45	10x99
200	1,12	1,17
600	1,19	1,22
1000	1,26	1,27

come già precedentemente esposto, può considerarsi come upper bound delle prestazioni ottenibili con altri criteri di assegnazione.

In Tabella 3.7 vengono riportati i valori dei Rack Energy Potential per le tre fasce di peso considerate, calcolati con ipotesi di dissipazione totale in frenata.

Si può notare che i valori di REP sono sempre più bassi per la scaffalatura verticale (22×45, shape factor = 0,74) rispetto a quella orizzontale (10×99, shape factor = 0,44) per ogni categoria di peso, confermando in tal modo che, indipendentemente dalle caratteristiche del carico, sfruttando lo spazio verticale negli AS/RS non si ottengono, come a prima intuizione si potrebbe pensare, consumi energetici più elevati rispetto a configurazioni meno sviluppate in altezza. Ciò è dovuto principalmente al contributo della gravità, che permette fasi di discesa a consumo energetico nullo (se non si adotta un sistema per il recupero) e ai minori spostamenti lungo l'asse orizzontale. Si può notare come per la scaffalatura maggiormente sviluppata verticalmente e un relativo aumento del 200% del peso del carico dell'unità (cioè passando da 200 kg a 600 kg unità di carico) si ottiene un 6,6% di aumento relativo del REP, che cresce al 13,2% quando si passa da carichi di 200 kg a carichi di 1000 kg. Questa crescita si riduce quando la scaffalatura è sviluppata più in senso orizzontale, con un 3,9% e un 7,8% di aumento, rispettivamente, a causa della minore importanza relativa della gravità sul consumo di energia. Il comportamento del fattore di forma sul consumo di energia è dunque differente da quello osservato in letteratura sul tempo. A questo proposito, due aspetti devono essere attentamente considerati quando si adotta una prospettiva energy-based, che non hanno alcuna influenza, invece, sulle prestazioni di tempo. In primo luogo la forza di gravità gioca un ruolo fondamentale, così lo sviluppo verticale può influire sulle prestazioni di energia quando cambiano i pesi dei prodotti. In secondo luogo, poiché i trasloelevatori di ultima generazione sono progettati per terminare la corsa di prelievo/stoccaggio simultaneamente sui due assi, l'accelerazione e la velocità del moto più veloce vengono ridotti e di conseguenza anche i relativi assorbimenti energetici. Pertanto, la differenza tra il momento di inerzia per lo spostamento orizzontale e verticale si riduce, diminuendo così l'impatto del fattore di forma sul rendimento energetico.

Si è valutato successivamente valutare le prestazioni dell'allocazione class-

based introdotta da Hausman et al. (1976) con l'obiettivo di combinare i vantaggi delle logiche condivise (per una migliore utilizzazione dello spazio di magazzino) con i vantaggi delle logiche dedicate (per sfruttare le caratteristiche dei prodotti) e che, come illustrato nel par. 3.1, porta a prestazioni intermedie tra quelle per allocazione casuale e quelle per allocazione casuale. Il magazzino viene suddiviso in un certo numero di zone e i prodotti in un ugual numero di classi a seconda della frequenza della domanda. Ogni classe di prodotti viene poi dedicata ad una precisa zona del magazzino all'interno della quale le u.d.c sono disposte con logica random. Mentre nella tradizionale logica time-based i confini di ciascuna zona vengono scelti in modo da comprendere le migliori locazioni in base al tempo di accesso, in un'ottica energy-based questi andranno selezionati in base al minor consumo energetico.

Si è considerato di suddividere la scaffalatura in 3 zone corrispondenti alle tre classi della domanda ABC. In questo caso il consumo energetico è stato calcolato valutando il REP per ogni zona e moltiplicandolo per il turnover della relativa classe di prodotti; nella class-based allocation, infatti, la scaffalatura può essere considerata come scomposta in tre sottosistemi di stoccaggio, ciascuna gestita con logica random.

Si è infine considerata l'allocazione stratificata descritta nel precedente paragrafo.

I risultati del confronto tra le diverse politiche di stoccaggio sono riportati in figura 3.12.

In generale, le politiche dedicate risultano le migliori, come atteso, con un risparmio energetico rispetto allo stoccaggio casuale che va dal 11,4% al 19,4%. Il miglior criterio di assegnazione dal punto di vista energetico risulta quello della energy-based full turnover policy per tutte le configurazioni.

Si ottengono buone prestazioni energetiche anche dalla politica per classi, analogamente a quanto riscontrato in letteratura per la prospettiva basata sul tempo (Hausman et al., 1976).

Come previsto, più sono ripide le curve di domanda, più aumentano i benefici nell'adottare politiche turnover-based (sia dedicate che basate su classi), dal momento che le posizioni migliori sono occupate dai prodotti maggiormente movimentati. Per la curva di domanda di 20-80, il turnover è un fattore più discriminante rispetto al peso delle unità di carico. Al contrario, per la curva 20-50 l'influenza del peso diviene più significativa. Per questo motivo la politica stratificata risulta migliore rispetto alla class-based e alla time-based full turnover, ed in generale, ottiene delle prestazioni relative piuttosto buone.

Per la scaffalatura sviluppata più verticalmente, dove la gravità gioca un ruolo importante sul consumo di energia, costringendo carichi pesanti ad occupare posizioni più basse, il consumo di energia viene ridotto in maniera più importante rispetto alle politiche dove il peso viene ignorato. Va sottolineato come, oltre alla stratificata, anche la politica EBFT, che risulta

essere la migliore per efficienza energetica, prenda in considerazione il peso del prodotto: ne tiene, infatti, conto al momento di individuare le migliori locazioni per ogni elemento. L'energia necessaria per servire una posizione dipende dal peso del carico da movimentare e le migliori posizioni cambiano per diversi pesi del carico, come precedentemente descritto nel par. 3.5.1.

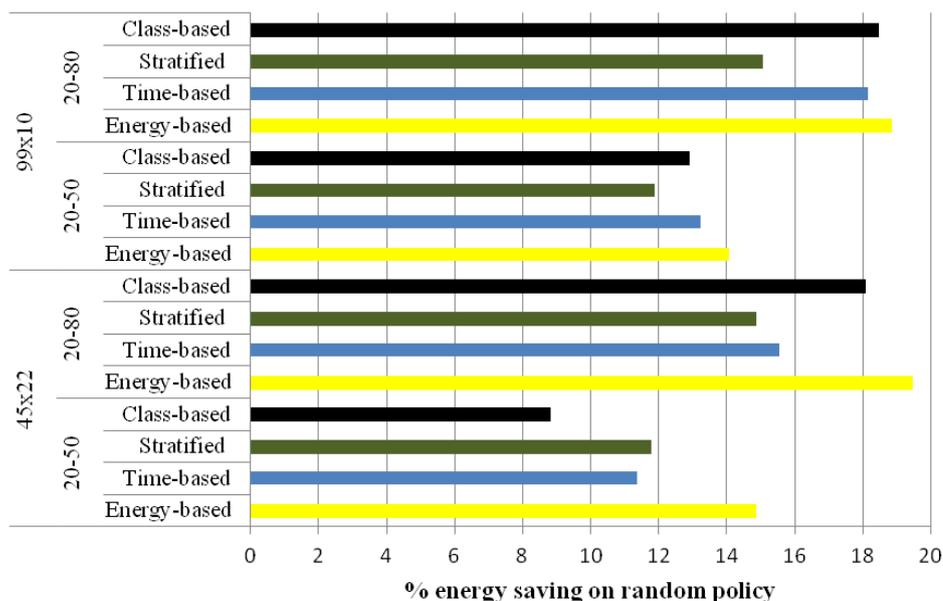


Figura 3.12. Risparmio energetico percentuale ottenuto con le diverse politiche (per classi, stratificata, time-based full turnover, energy-based full turnover) rispetto all'allocazione casuale.

La tradizionale politica full turnover basata sul tempo, se comparata ad una politica casuale, porta a magazzini comunque energeticamente efficienti. Tuttavia, quando le scaffalature sono molto sviluppate verticalmente per sfruttare meglio lo spazio, riducendo l'occupazione a pavimento, la forza di gravità (così come il peso dell'unità di carico) gioca un ruolo più significativo sul consumo di energia. In questo caso, dedicare ai prodotti le locazioni secondo un'ottica energy-based, porta ad una riduzione relativa del 5,1% sul consumo di energia, mentre il tempo viene peggiorato del 3,6%. Per scaffalature sviluppate orizzontalmente, invece, si ottiene un minor risparmio energetico pari al 1,7% e un analogo peggioramento in tempo, 1,6%.

La gestione di pesi multipli in una scaffalatura porta quindi ad aumentare il trade-off tra il livello di servizio percepito dal cliente, legato al tempo, e l'efficienza energetica, che è direttamente collegata ai costi logistici nonché all'impatto ambientale dell'azienda. L'impresa dovrà dunque optare per la prestazione che considera maggiormente in grado di aumentarne il vantaggio competitivo, adottando di conseguenza l'ottica time-based o quella energy-

based nel processo di storage assignment.

3.6 Politiche di allocazione dinamica

Nei paragrafi precedenti si è visto come la politica full turnover basata sull'energia porti alle migliori performance di consumo energetico; la EBFT, come tutte le politiche dedicate, risulta, tuttavia, di difficile applicazione, dal momento che, ad ogni cambiamento nella domanda di un prodotto o del mix di prodotti, è necessario riconfigurare le zone dedicate ai vari prodotti per non degradarne le prestazioni.

La politica class-based consente maggiore flessibilità nel fronteggiare variazioni della domanda, ma richiede maggiore energia (e tempo) per compiere le varie operazioni, anche se le prestazioni sono significativamente migliori rispetto al criterio casuale.

Nel tentativo di migliorare sia la flessibilità sia il risparmio energetico, si è studiata una strategia di allocazione energy-based di tipo dinamico, denominata *best energy open location strategy*. Con questa politica, un prodotto in ingresso viene stoccato nella locazione libera a consumo energetico minore all'interno della classe di appartenenza; analogamente, per la fase di recupero, viene prelevato il prodotto dalla locazione che minimizza l'energia del ciclo di prelievo. Dal momento che i prodotti non sono liberi di occupare in modo casuale ogni locazione, le posizioni assegnate a una classe non hanno la stessa probabilità di essere visitate, come nella politica per classi tradizionale. Assistiamo ad una concentrazione di elementi nelle posizioni che richiedono la minima energia di movimento, mentre le posizioni peggiori all'interno di una classe vengono occupate solo quando le scorte raggiungono i valori più alti.

Sulla base di come le classi vengono identificate, è possibile analizzare due differenti opzioni di allocazione dinamica: la turnover-based e la weight-based.

Nella politica dinamica turnover-based, le classi vengono identificate dalla curva di domanda ABC, in modo simile alla politica di class-based tradizionale. In questo caso, le tre classi prendono la forma di gradino, similmente all'allocazione EBFT, che può essere infatti ritenuta una allocazione per classi estrema, in cui il numero delle classi è pari al numero di prodotti. La dimensione di ciascuna zona è tale da coprire la peggiore ipotesi possibile, cioè quella di avere tutti i prodotti allocati simultaneamente nella scaffalatura.

Nella politica dinamica weight-based la suddivisione delle classi avviene a seconda del peso dei prodotti; la scaffalatura viene stratificata come proposto nel par. 3.5.1, con carichi appartenenti alla classe di peso maggiore vincolati ad occupare gli strati inferiori, mentre le classi di peso minore vengono assegnati alle fasce della scaffalatura più elevate.

Al fine di valutare il consumo energetico delle strategie dinamiche e confrontarlo con la politica dedicata EBFT, che risulta finora la best performer dal punto di vista energetico, si è condotta una campagna simulativa su 4500 operazioni di prelievo e conseguenti riordini come da ipotesi del par. 3.2. Attraverso uno specifico programma creato in linguaggio C è stato possibile calcolare i valori di energia e di tempo delle due allocazioni dinamiche proposte.

I risultati ottenuti sono proposti nella tabella 3.8.

Tabella 3.8. Prestazioni di tempo ed energia per le politiche EBFT e best energy open location nelle modalità dynamic turnover-based e weight-based.

Scaf	Curva	Energia [MJ]			Tempo [h]		
		Full turnover	Dynamic turnover	Dynamic weight	Full turnover	Dynamic turnover	Dynamic weight
10×99	20-50	4644	2859	1615	86	65	44
	20-80	4456	1765	1895	82	43	51
22×45	20-50	4492	2005	2478	98	46	77
	20-80	4314	1684	2590	95	38	76

Le strategie best energy open location superano in modo significativo le prestazioni della politica EBFT per tutte le combinazioni di scaffalatura e curva di domanda considerate, con un risparmio minimo del 38%. Per la curva 20-80 rispetto all’allocazione dedicata il risparmio della politica dynamic turnover-based è di circa il 60%, mentre il risparmio di tempo è maggiore del 48%. Queste prestazioni sono dovute al fatto che, nell’allocazione dedicata, i prodotti devono occupare esclusivamente le locazioni a loro adibite; ne deriva che le locazioni a consumo energetico migliore sono lasciate vuote quando i prodotti a loro assegnati raggiungono la scorta minima, mentre le stesse potrebbero essere più convenientemente occupate da un altro prodotto, come avviene nell’allocazione dinamica. Dato il legame tra il tempo e l’energia, anche le prestazioni di tempo risentono beneficamente dell’utilizzo delle politiche dinamiche energy-based, con un risparmio di tempo minimo del 20% rispetto alle politiche dedicate.

I risultati ottenuti dalle politiche dinamiche proposte rispecchiano dunque dal punto di vista energetico i risultati ottenuti da Gagliardi et al. (2012a) dal punto di vista temporale per prodotti con $LTPR > 1$ (nel nostro caso $LTPR = 9,9$), riportati nel par. 3.1.

La strategia dinamica turnover-based risulta energeticamente migliore rispetto a quella dinamica weight-based ogni qualvolta la frequenza di turnover risulti un fattore più determinante del peso dei prodotti. La stratificazione della scaffalatura, tuttavia, potrebbe consentire di ridurre i costi di investimento a causa della diminuzione della sezione trasversale degli elementi resistenti della scaffalatura; questa riduzione potrebbe compensare i maggiori costi operativi legati ai più alti consumi di energia. Dal punto di vista

ambientale, la stratificazione comporta un minor utilizzo di acciaio per la scaffalatura, con una riduzione delle emissioni di anidride carbonica per la produzione dei profilati, che potrebbe in parte bilanciare l'aumento delle emissioni di gas serra clima-alteranti legate alla produzione di energia elettrica necessaria per i movimenti del trasloelevatore. La stratificazione della scaffalatura e la conseguente adozione di politiche di assegnazione stratificate deve dunque essere analizzata e valutata attentamente in fase di progettazione dell'AS/RS; tale problematica sarà oggetto di analisi nel capitolo dedicato alla progettazione sostenibile dei magazzini automatizzati.

Con le strategie dinamiche l'effetto della variazione della domanda è amplificato con un fattore di forma inferiore (scaffalatura a sviluppo orizzontale): per la politica dinamica basata sul turnover, per esempio, passare da una distribuzione 20-50 ad una più ripida 20-80 porta ad un aumento relativo del risparmio energetico del 16% per la scaffalatura 22×45 (fattore di forma 0,74) e del 38% per la 10×99 (fattore di forma 0,44). Per la strategia dinamica basata sul peso, si registra un aumento relativo del 5% del consumo di energia quando si passa da una curva 20-50 ad una 20-80 per la scaffalatura 22×45, mentre questo peggioramento è amplificato al 17% per la scaffalatura 10×99 (si vedano i valori in tabella 3.8). Analoghi comportamenti si ottengono per le prestazioni di tempo.

Come implicazione pratica ne deriva che, adottando politiche di allocazione dinamica, le scaffalature a sviluppo verticale sono meno sensibili alla distribuzione di domanda rispetto a quelle maggiormente sviluppate orizzontalmente, le cui prestazioni energetiche sono invece più sensibili alle variazioni nella frequenza di movimentazione. Va inoltre sottolineato che le prestazioni riscontrate dalla politica dynamic weight-based risultano migliori per scaffalature sviluppate orizzontalmente, in quanto la stratificazione, operando in senso orizzontale, crea delle classi più "sottili", dove mediamente i percorsi dall'I/O sono minori rispetto a quelli ottenibili da una scaffalature sviluppate verticalmente con fasce più "larghe".

3.7 Conclusioni

Un approccio sostenibile nella logistica richiede un cambiamento nella gestione delle operations, spostando la tradizionale prospettiva basata sul tempo verso una orientata alla minimizzazione dei consumi energetici. Questo si può tradurre, nei sistemi AS/RS, nel rivedere i criteri di storage assignment, in modo tale che l'energia consumata dal trasloelevatore possa essere ridotta.

L'allocazione dei prodotti energy-based full turnover risulta essere, dal punto di vista energetico, migliore rispetto alle comuni politiche random, per classi e time-based full turnover; tuttavia, le strategie best energy open location, che assegnano dinamicamente i prodotti alla prima locazione libera a consumo energetico minore della classe di appartenenza, superano le per-

formance sia temporali che energetiche delle politiche dedicate full turnover e dovrebbero, pertanto, essere preferite come strategia di stoccaggio.

Se le unità di carico nella scaffalatura sono di pesi differenti, mutano le forme delle zone dedicate ai prodotti e il trade-off tra tempo e consumo energetico risulta amplificato, soprattutto con strutture sviluppate verticalmente. I sistemi a peso multiplo possono rendere conveniente, inoltre, l'adozione di politiche di stoccaggio stratificato.

I criteri di storage assignment possono influenzare in modo significativo il consumo di energia nei magazzini automatizzati. Migliorare l'efficienza energetica porta ad ottenere benefici per l'ambiente grazie alla riduzione delle emissioni di gas serra per la generazione dell'energia elettrica da combustibili fossili necessaria per la movimentazione del trasloelevatore.

Un minor consumo energetico comporta anche una riduzione dei costi di fornitura dell'energia e quindi dei costi operativi del magazzino, che, come sottolineato dall'indagine commissionata dalla MHIA (MHIA, 2011b) stanno assumendo un'importanza crescente come driver per le decisioni in campo logistico. Anche il costo di investimento di un AS/RS può essere influenzato dalla politica di stoccaggio, soprattutto qualora si rendano possibili modifiche alla struttura della scaffalatura come con la stratificazione; in questo caso le sezioni trasversali dei componenti in acciaio della scaffalatura possono essere progressivamente ridotte dal basso verso l'alto, con risparmio di costi sia per i montanti sia per i correnti ed un minor utilizzo complessivo di acciaio con relativa ridotta impronta carbonica del magazzino.

Si può dunque concludere che le politiche di stoccaggio di tipo energy-based possano considerarsi degli strumenti efficaci per perseguire una *sustainable logistics*, essendo in grado di incidere sia sulla dimensione ambientale sia su quella economica della sostenibilità di un AS/RS.

Capitolo 4

Politiche di dwell point

Una tipica decisione di pianificazione degli Automated Storage and Retrieval Systems è la posizione di *dwell point*, ovvero la posizione in cui il trasloelevatore, in fase di inattività, attende fino alla successiva operazione da compiere. Questa problematica, in letteratura, è stata tradizionalmente studiata con l'obiettivo di minimizzare il picking time, considerato come la principale prestazione da perseguire nella gestione del magazzino. I nuovi paradigmi legati alla sostenibilità (vedi cap. 1.1) spingono verso un cambiamento di tale prospettiva, cercando di spostare il focus sull'efficienza energetica. In quest'ottica è stato affrontato il problema del *dwell point*, valutando la posizione ottimale per le due differenti prospettive e confrontando le performance sia in termini di tempo che di energia per un'allocazione di tipo dedicato. Attraverso un'analisi fattoriale degli esperimenti si è indagato sull'influenza di alcuni fattori, quali la distribuzione di domanda ABC dei prodotti, la geometria della scaffalatura e la strategia di allocazione, sulla scelta del *dwell point*. Parte dei risultati ottenuti nel presente capitolo sono stati presentati al convegno AMST 2011 - Advanced Manufacturing Systems and Technology (Meneghetti and Monti, 2011a).

4.1 Introduzione

La strategia di *dwell point* consiste nel determinare la posizione di riposo del trasloelevatore durante le fasi di inattività, ossia quando non vi sono richieste di stoccaggio/prelievo in coda; questo si traduce nel ricercare la locazione che minimizza la distanza dalla futura e ancora sconosciuta richiesta. L'idea è quella di approfittare dei periodi di inattività del sistema per muovere in anticipo il trasloelevatore, in modo da collocarlo in una posizione verosimilmente più conveniente per servire la prossima locazione; tale traslazione non influenza il tempo di risposta percepito dai clienti, il quale viene calcolato solo dal momento in cui arriva una richiesta di prelievo all'AS/RS.

Adottando un approccio sostenibile, l'obiettivo principale da perseguire si sposta dalla minimizzazione del picking time all'ottimizzazione del consumo energetico.

Se dal punto di vista temporale si potrebbero ottenere dei vantaggi dall'anticipare il movimento del trasloelevatore, dato che tale spostamento risulta essere *no time sensitive* per il cliente, dal punto di vista energetico ogni spostamento comporta comunque un consumo di energia e quindi potrebbe non essere una scelta vincente, soprattutto qualora il trasloelevatore sia già posizionato alla stazione I/O, a causa di un recupero precedente e si trovi a dover eseguire uno stoccaggio.

Nei successivi paragrafi si valuterà, dunque, sia nell'ottica di minimizzazione del tempo che dell'energia, la locazione più "conveniente" in cui posizionare il trasloelevatore per attende la successiva operazione da compiere. Verranno valutate le prestazioni di tempo ed energia nell'ipotesi di cicli singoli di prelievo per le diverse locazioni di *dwell point* identificate, in modo da fornire uno strumento di supporto alle decisioni, che consenta di operare la scelta più corretta in base della primaria prestazione da perseguire.

Le prestazioni di picking sono fortemente influenzate dalla politica di allocazione, come visto nel cap. 3; in questo studio il problema di *dwell point* è stato esaminato considerando la politica di allocazione dedicata full turnover, dove le locazioni della scaffalatura più "convenienti" sono assegnate ai prodotti con più alto turnover. Tale "convenienza" va letta a seconda dell'obiettivo da perseguire; in un ottica time-based i prodotti con turnover maggiore verranno assegnati alle posizioni della scaffalatura con il minor tempo di accesso (politica TBFT), mentre nell'ottica energy-based i prodotti maggiormente movimentati saranno assegnati alle posizioni che comportano il minor consumo energetico del trasloelevatore (politica EBFT), come evidenziato nel paragrafo 3.3.

Il capitolo è stato organizzato come segue: nel paragrafo 4.2 viene presentata la review della letteratura sulle politiche di dwell point, nel paragrafo 4.3 vengono selezionate le locazioni di *dwell point* ottimali per minimizzare il tempo e l'energia, mentre le simulazioni eseguite e i risultati ottenuti vengono esplicitati nei paragrafi 4.4 e 4.5. Nel paragrafo 4.6, infine, si riassumono le conclusioni dello studio.

4.2 Review della letteratura

Semplici regole, espressioni analitiche in forma chiusa e approcci di programmazione matematica sono stati proposti in letteratura, per varie configurazioni di AS/RS, per definire la posizione di *dwell point*.

Bozer and White (1984) hanno introdotto quattro semplici strategie *statiche* di dwell point:

1. Posizionare, in fase di inattività, il trasloelevatore alla stazione di input;
2. Posizionare, in fase di inattività, il trasloelevatore alla stazione di output;
3. Posizionare, in fase di inattività, il trasloelevatore nella posizione centrale della scaffalatura;
4. Posizionare dinamicamente, in fase di inattività, il trasloelevatore nell'ultima locazione visitata.

Egbelu (1991) ha aggiunto altre due strategie per rispondere in modo *dinamico* ai cambiamenti della domanda di stoccaggi e prelievi:

1. Posizionare in modo dinamico il trasloelevatore alla locazione che minimizza il tempo atteso di viaggio o di risposta dal dwell point alle future locazioni che verranno servite (*minimum expected response time*);
2. Posizionare in modo dinamico il trasloelevatore alla locazione che minimizza il tempo di viaggio o di risposta massimo atteso dal dwell point alle future locazioni che verranno servite (*maximum response time minimizing*).

Le locazioni ottime di dwell point corrispondenti a queste strategie sono state identificate con la programmazione lineare, sotto l'ipotesi che il rapporto tra le richieste di recupero e di stoccaggio durante l'intervallo di tempo considerato sia noto, in modo tale da poter stabilire la probabilità attesa di una richiesta di stoccaggio o di prelievo. Viene assunto inoltre, pur non sapendo l'esatta tempistica delle singole richieste di prelievo, che il numero di prelievi di ciascun prodotto nel periodo sia conosciuto, al fine di stabilire la probabilità che ciascun codice venga richiesto nel periodo di tempo analizzato.

Hwang and Lim (1993) hanno dimostrato che le formulazioni di Egbelu possono essere ricondotte ad un *facility location problem*, riducendo in questo modo i tempi computazionali di due ordini di grandezza: il problema di *minimum expected response time*, in particolare, è riconducibile ad un *single facility minimum Tchebychev location problem*, mentre il problema di *maximum response time minimizing* ad un *facility minimax Tchebychev location problem*.

Peters et al. (1996) hanno sviluppato dei modelli analitici in forma chiusa per determinare il minimo tempo di percorrenza previsto per scaffalature *square in time* e *rectangular*, considerate continue, nell'ipotesi di allocazione random dei prodotti a magazzino, similmente a Van den Berg (2002), dove la stazione di input non è limitata all'angolo in basso a sinistra della scaffalatura. Park (1999) ha presentato un modello analitico per la minimizzazione

del tempo atteso in scaffalature *square in time* con di politica allocazione dei prodotti di tipo dedicato.

Questi modelli in forma chiusa sono tutti basati sul modello di tempo proposto da Bozer and White (1984), il quale assume che il trasloelevatore si muova secondo un moto rettilineo uniforme.

Dalla comparazione delle prestazioni di tempo delle diverse strategie è emerso che la posizione ottimale di dwell point risulta essere la stazione di input, indipendentemente dalla dimensione della scaffalatura e/o politica di stoccaggio adottata, ogni qualvolta la probabilità che la futura operazione sia un'operazione di stoccaggio è maggiore o uguale a 0,5 (Park, 1991).

Attraverso la simulazione, Egbelu and Wu (1993) hanno rilevato che la strategia di *minimum expected travel time* porta a prestazioni migliori rispetto alle altre strategie, sia per allocazioni dedicate che per allocazioni di tipo random; hanno inoltre riscontrato buone performance dalla semplice strategia di posizionamento del trasloelevatore nella stazione di input (*input dwell point policy*). Anche Park (1999) sostiene che, per i comuni AS/RS con input e output coincidenti, la politica *input dwell point* risulta essere una buona alternativa per ottimizzare il tempo di prelievo atteso, specialmente per allocazioni di tipo dedicato con distribuzioni di domanda molto ripida.

Meller and Mungwattana (2005) hanno dimostrato che per magazzini con elevato numero di movimentazioni, la scelta del dwell point risulta essere marginale; essi consigliano pertanto l'implementazione di politiche semplici, come ad esempio l'*input dwell point policy*, piuttosto che politiche complesse, in quanto i trasloelevatori verranno impiegati per un'elevata percentuale di tempo, rendendo gli eventuali miglioramenti apportati da politiche ottimizzanti (in senso matematico) quasi trascurabili.

4.3 Identificazione delle locazioni di dwell point

Basandosi sui risultati della letteratura, si sono selezionate e confrontate, in termini di tempo e di consumo energetico, due politiche di dwell point: la *minimum expected travel time policy* e l'*input dwell point policy*.

Come già precedentemente riportato, Park (1999) sostiene che la miglior politica di dwell point in ottica time-based nell'ipotesi di allocazione dedicata sia la *minimum expected travel time*; l'autore dichiara inoltre che la politica di *input dwell point* rappresenta un'ottima alternativa e si avvicina alla soluzione ottimale per curve di domanda molto ripide. Nella sua analisi la locazione ottima viene calcolata analiticamente in forma chiusa come funzione della probabilità p_s di avere richieste di stoccaggio a seguito del periodo di inattività del trasloelevatore.

In questo studio, l'attenzione è stata rivolta ai sistemi con $p_s=0$, ovvero ai periodi dove vi sono esclusivamente operazioni di prelievo, dal momento che tale situazione risulta essere di grande interesse per le applicazioni reali.

Le richieste di stoccaggio, solitamente, arrivano infatti in precisi e conosciuti momenti della giornata lavorativa, si pensi ad esempio all'arrivo programmato dei camion provenienti dai fornitori, piuttosto che all'arrivo di prodotti finali comunicati e inviati dalle linee di produzione. Se vengono utilizzati dei nastri trasportatori per movimentare le unità di carico verso la stazione di input dell'AS/RS, l'arrivo di quest'ultime è reso noto nel momento in cui queste vengano caricate sul nastro trasportatore; in questo caso, il trasloelevatore sarà posizionato convenientemente alla stazione di input per eseguire un ciclo singolo di stoccaggio o un ciclo doppio se nel frattempo è pervenuta una richiesta di prelievo. Si deve poi considerare che in un'ottica di risparmio energetico le attività potrebbero essere pianificate tenendo in considerazione eventuali prezzi di vendita dell'energia differenziati nell'arco della giornata, come ad es. le minori tariffe legate alle ore notturne; questa peculiarità del mercato potrebbe essere sfruttato opportunamente concentrando le operazioni non a valore aggiunto come quelle di replenishment dell'AS/RS durante tali periodi. Ne deriva che gli stoccaggi potrebbero essere eseguiti in un periodo definito della giornata e dunque aumentare drasticamente la probabilità di avere esclusivamente operazioni di prelievo durante la restante parte della giornata.

Nell'ipotesi di considerare sole operazioni di prelievo, il punto di sosta ottimale del trasloelevatore può essere calcolato come il baricentro temporale della scaffalatura (*gravity center*), ovvero come la posizione che minimizza il tempo di risposta atteso per una richiesta futura di prelievo (Park, 1999). La politica di *input dwell point* nell'ipotesi di sole operazioni di prelievo dal punto di vista time-based ottiene le sue peggiori performance; tuttavia, Park dimostra che, anche in queste condizioni, le differenze ottenibili dall'*input dwell point* e dall'*optimal dwell point* sono modeste per curve di domanda molto ripide.

Dal punto di vista energetico è necessario considerare che il trasloelevatore, dopo aver concluso un ciclo di prelievo, si trova alla stazione di I/O e per collocarlo in una locazione di attesa ritenuta favorevole è necessario spendere dell'energia. In altre parole, se dal punto di vista temporale lo spostamento alla locazione di dwell point avviene a "costo zero" perchè non considerabile nel computo del tempo di risposta al cliente, dal punto di vista energetico qualunque traslazione porta ad un consumo di energia.

Diventa così intuitivo capire che in un ottica energy-based la posizione di dwell point migliore risulti essere la stazione di input/output.

La locazione migliore di dwell point per allocazione dedicata e per $p_s=0$ risulta dunque essere il baricentro temporale della scaffalatura nell'ottica time-based, mentre in ottica sostenibile la locazione migliore è rappresentata dalla stazione di input, supposta coincidente alla stazione di output e collocata nell'angolo in basso a sinistra della scaffalatura.

Ci si pone ora due domande relative alle prestazioni ottenibili dal posizionamento del trasloelevatore a riposo nei dei due punti ottimali appena

individuati: se il dwell point è posto al baricentro della scaffalatura per capitalizzare il livello di servizio offerto al cliente, qual è l'incremento atteso di energia rispetto alla strategia di *input dwell point*? Se un aumento dei costi energetici porta a preferire l'efficienza energetica come obiettivo da perseguire e quindi a selezionare come dwell point la stazione di I/O, qual è il peggioramento del picking time? Nei paragrafi successivi si è cercato dare risposta a tali quesiti.

4.4 Esperimenti simulativi

In questo studio, al fine di valutare le performance di tempo e di energia in ottica time ed energy based, si è sostituito il modello semplificato di Bozer and White (1984) su cui si basano gli studi di letteratura (par. 4.2) con quello proposto nel capitolo 2, in modo da tenere opportunamente conto delle fasi di accelerazione e decelerazione, che non possono essere trascurate in quanto impattano in modo significativo sul consumo energetico, nonché delle nuove caratteristiche dei trasloelevatori di ultima generazione.

Sono state effettuate delle analisi simulative per confrontare le prestazioni delle politiche di dwell point selezionate, ovvero l'*input policy* e la politica di *minimum expected time*. Come riportato nel paragrafo 4.3, per la seconda politica la locazione ottima che minimizza il tempo di risposta atteso per una richiesta futura, nell'ipotesi di sole richieste di prelievo nel periodo di analisi, risulta essere il baricentro temporale della scaffalatura (G).

Per l'analisi si sono considerate le seguenti ipotesi:

- le movimentazioni avvengono esclusivamente per unità di carico;
- tutte le locazioni hanno la stessa dimensione ($l = 1, 2$, $h = 1, 4$) e possono immagazzinare qualsiasi tipo di prodotto;
- vengono considerati esclusivamente cicli semplici (*single command*) di prelievo ($p_s=0$);
- le stazioni di input e output coincidono e sono collocate all'angolo in basso a sinistra della scaffalatura;
- si adotta una politica di rifornimento di tipo *reorder-point* con dimensione del lotto pari all'Economic Order Quantity (EOQ), considerando un medesimo rapporto dei costi di gestione a scorta e di emissione dell'ordine per tutti i codici, in modo da evitare di introdurre fattori di disturbo legati alle diverse politiche di supply;
- sono stati considerati 100 differenti prodotti (peso 1000 kg) con domanda decrescente;

- si è considerata un'allocazione full turnover, che è la best performer tra le strategie statiche di allocazione, al fine di minimizzare il tempo o l'energia spesa (par.3.4.3). La dimensione di ogni zona dedicata a ciascun prodotto è pari al suo lotto di rifornimento;
- ogni locazione j della scaffalatura viene visitata con frequenza λ_j , direttamente legata alla domanda del prodotto assegnato e al numero di locazioni ad esso assegnate.

Sono state, inoltre, considerate le ipotesi di base esplicate nel paragrafo 2.1 per l'adozione dei modelli di tempo ed energia.

Il baricentro della scaffalatura G (scelto tra tutti i potenziali baricentri P) viene individuato come la posizione che minimizza la somma pesata (sulla frequenza di accesso) dei tempi di picking necessari per spostarsi dal punto selezionato a tutte le altre locazioni della scaffalatura, ovvero:

$$G : \sum_j \lambda_j T_{G-j} = \min_P \left\{ \sum_j \lambda_j T_{P-j} \right\} \quad (4.1)$$

dove T_{P-j} è il tempo di *interleaving* necessario per raggiungere la posizione j -esima della scaffalatura partendo dal potenziale baricentro P . Il tempo per ritornare alla stazione di I/O non viene considerato in quanto questo viaggio deve sempre essere eseguito nel ciclo di prelievo e non dipende dalla locazione di dwell point.

Sono state comparate le performance di tempo e di energia per 53090 operazioni di prelievo (pari al totale delle operazioni attese nell'orizzonte temporale pianificato) per le due locazioni di dwell point G e I/O; i cicli di prelievo per le due differenti strategie sono schematizzati in figura 4.1.

La geometria della scaffalatura, come visto nel capitolo 3, influenza le prestazioni dell'AS/RS, per questo motivo si sono selezionate, per la medesima capacità di stoccaggio, due differenti geometrie quale fattore di analisi. In particolare si sono confrontate le prestazioni di un magazzino automatizzato molto sviluppato orizzontalmente con 99 colonne e 10 livelli con uno maggiormente sviluppato verticalmente, caratterizzato da 45 colonne e 22 livelli, per un totale di 990 posizioni disponibili in entrambi i casi. Le specifiche dei trasloelevatori utilizzati per servire queste due scaffalature sono le medesime di quelle riportate in tabella 3.1.

La letteratura ha evidenziato che le prestazioni di tempo della politica *input dwell point* si avvicinano alle prestazioni della politica *minimum expected time* per curve di domanda molto ripide; per tale motivo sono state considerate due differenti distribuzioni ABC di domanda, una distribuzione 20-50 (il 20% dei prodotti contribuisce al 50% delle operazioni), ed una più ripida, la distribuzione 20-80.

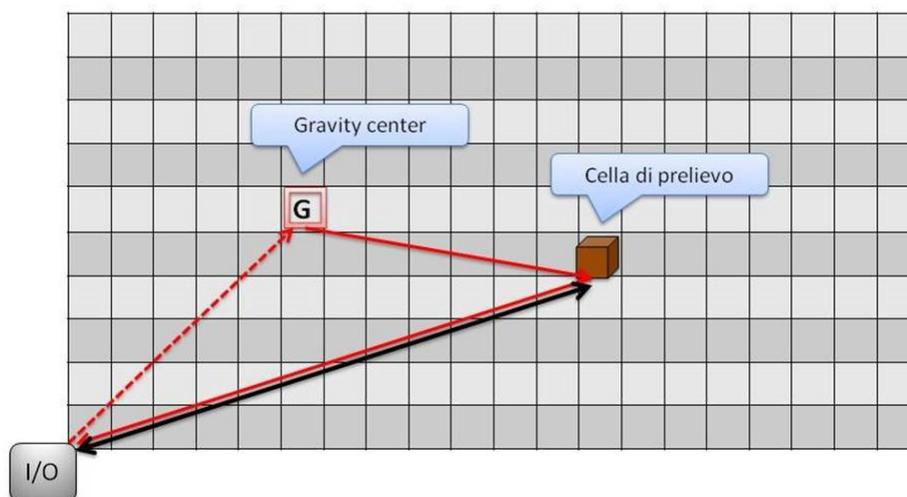


Figura 4.1. Percorso di prelievo nel caso di dwell point alla stazione di I/O (percorso in nero) e nel caso di dwell point al baricentro della scaffalatura G (percorso in rosso)

Un ulteriore fattore preso in esame è il tipo di allocazione dedicata dei prodotti: si è utilizzata sia la strategia di allocazione TBFT, sia quella EBFT (si veda par. 3.3).

Il *gravity center* della scaffalatura viene calcolato mediante l'equazione 4.1 e varia al variare dei fattori considerati. Le performance sono state valutate mediante un'analisi fattoriale degli esperimenti del tipo 2^3 , i cui risultati vengono riassunti nel paragrafo successivo.

4.5 Risultati

Dai risultati della simulazione emerge la possibilità di ottenere un miglioramento medio del tempo di prelievo totale pari al 16,9%, utilizzando la strategia di *minimum expected travel time* piuttosto che l'*input policy*. A questo vantaggio, si contrappone però un aumento medio del consumo energetico pari al 32,4%.

Vi è pertanto un trade-off tra il miglioramento delle performance di tempo e le prestazioni energetiche a seconda della posizione di *dwell point* adottata. L'*input policy* risulta preferibile ogni qualvolta il risparmio energetico diventa di primaria importanza, ad esempio a causa di un aumento dei costi di approvvigionamento; in caso contrario, è preferibile adottare la politica di *minimum expected time*, al fine di ottenere la massima riduzione dei tempi di picking.

Dall'analisi fattoriale emerge che, mentre il tempo di picking è influenzato solo marginalmente dai fattori considerati (il massimo effetto ha una magnitudine di 1,7%), si ottengono cambiamenti più significativi sul consumo di energia qualora il dwell point venga spostato al baricentro della scaffalatura (tab. 4.1). Dal momento che, per le prestazioni energetiche, le interazioni tra i fattori non sono trascurabili rispetto agli effetti dei fattori principali, si è preferito riportare i risultati delle simulazioni in tabella 4.1 piuttosto che descrivere gli effetti in forma grafica, che sarebbe risultata meno intuitiva.

Tabella 4.1. Variazione percentuale relativa spostando il dwell point dalla stazione di I/O al baricentro temporale della scaffalatura

Scaf.	Curva	TBFT		EBFT	
		tempo(%)	energia(%)	tempo(%)	energia(%)
10×99	20-50	-16,74	31,24	-16,53	31,16
	20-80	-16,45	27,87	-14,29	43,38
22×45	20-50	-17,72	34,04	-17,84	27,75
	20-80	-17,56	32,32	-17,81	31,42

Dalla tabella 4.1 è possibile notare che, per un'allocazione TBFT, i vantaggi di tempo ottenibili adottando una strategia *minimum expected travel time* piuttosto che *input policy* si riducono all'aumentare della pendenza della curva di domanda, confermando i risultati ottenuti analiticamente da Park (1999) con un modello a moto rettilineo uniforme. Analogamente gli incrementi nel consumo di energia per curve più ripide risultano più contenuti.

Dei piccoli miglioramenti di tempo e più significativi consumi di energia vengono riscontrati nell'adottare il centro di gravità quale locazione di dwell point per scaffalature maggiormente sviluppate in altezza.

Vengono registrati comportamenti opposti sui valori energetici per le due strategie di *dwell point* in caso di adozione della allocazione EBFT; si può notare in tabella 4.1 come la differenza tra il consumo energetico, relativo della curva 20-80, della scaffalatura maggiormente sviluppata in orizzontale e quella verticale sia, infatti, del 12%. Per scaffalature molto sviluppate orizzontalmente cosiccome per curve di domanda poco ripide, quando i prodotti vengono allocati su base energetica, il centro di gravità della scaffalatura risulta essere più distante dall'I/O, comportando un peggioramento delle prestazioni energetiche. Ciò è dovuto al fatto che, mentre il baricentro viene calcolato su base temporale (eq. 4.1), con la EBFT i prodotti più frequentemente movimentati vengono assegnati alle zone a gradino in base al consumo energetico.

Per scaffalature sviluppate in altezza, l'allocazione EBFT può limitare il consumo energetico (risparmio relativo del 6% di energia rispetto all'allocazione TBFT per la curva 20-80) rinunciando al 3% della riduzione re-

lativa di tempo rispetto all'allocazione TBFT. Questo approccio ibrido, che consiste nell'adottare una politica energy-based di stoccaggio e una politica time-based di dwell point, potrebbe quindi consentire un potenziale compromesso tra le prestazioni di tempo e di energia per AS/RS molto sviluppati verticalmente.

4.6 Conclusioni

Il passaggio dalle tradizionali prospettive basate sul tempo ad altre orientate alla sostenibilità porta a rivedere le politiche di dwell point tenendo in considerazione l'efficienza energetica.

Nelle ipotesi di allocazione dedicata e sole operazioni di prelievo, l'utilizzo del baricentro temporale della scaffalatura quale locazione a cui spostare anticipatamente il trasloelevatore in attesa di comando favorisce la riduzione dei tempi di picking, ma a contempo porta ad aumenti del consumo di energia rispetto alla strategia di *input dwell point*. Risulta pertanto necessario gestire il trade-off tra tempo di picking e il risparmio energetico. Quando l'efficienza energetica rappresenta l'obiettivo principale da perseguire, il trasloelevatore deve attendere le future richieste alla stazione di I/O; in caso contrario, posizionare il trasloelevatore nel baricentro temporale della scaffalatura rappresenta il modo ottimale per migliorare il servizio offerto al cliente, ma a scapito del peggioramento delle prestazioni energetiche del sistema.

Capitolo 5

Politiche di sequencing

Gli obiettivi di efficienza energetica nei magazzini AS/RS possono essere perseguiti ottimizzando i cicli che deve compiere il trasloelevatore in modo da minimizzare il consumo energetico per la movimentazione. Le operazioni di prelievo sono tradizionalmente ottimizzate per minimizzare i tempi di picking, essendo essi direttamente legati al servizio percepito dal cliente; un approccio sostenibile porta a cambiare questa prospettiva e sposta l'obiettivo dell'ottimizzazione sulla minimizzazione del consumo energetico.

In questo capitolo si propone dunque un'ottimizzazione del risequenziamento degli ordini di prelievo per cicli combinati (*dual command*), al fine di minimizzare il consumo energetico. Dopo aver elaborato una euristica *greedy* per una prima analisi, viene adottato il *Constraint Programming* per la fase di modellazione, successivamente ibridato con la tecnica di *Large Neighborhood Search* per la fase di solving, con lo scopo di ottenere una soluzione vicina a quella ottima in tempi computazionali ragionevoli. Viene valutato l'impatto sulle prestazioni di tempo ed energia, adottando l'ottimizzazione per cicli doppi rispetto a cicli singoli, per due differenti tipologie di allocazione: un'allocazione full turnover e un'allocazione dinamica per classi. Lo studio viene effettuato su diversi fattori che influenzano il consumo energetico e il tempo; i fattori considerati sono la distribuzione della domanda, l'obiettivo del risequenziamento (minimizzazione del tempo o dell'energia) la geometria della scaffalatura e la politica di allocazione. L'analisi viene condotta mediante un disegno fattoriale degli esperimenti 2^4 .

Alcuni risultati preliminari (par. 5.3) sono stati presentati al convegno World Renewable Energy Congress (Meneghetti and Monti, 2011b).

5.1 Introduzione

I cicli dual command permettono di effettuare le operazioni di stoccaggio e di prelievo in un unico viaggio del trasloelevatore, in modo da poter eliminare i

viaggi a vuoto della macchina dall'I/O alla locazione di prelievo e quelli dalla locazione di stoccaggio all'I/O, propri dei cicli singoli (dove il trasloelevatore compie un ciclo per ogni operazione di prelievo/stoccaggio).

In un ciclo doppio, quindi, il trasloelevatore parte dalla stazione di I/O con il carico a bordo e raggiunge la posizione di stoccaggio desiderata, deposita il carico e si muove direttamente verso la posizione di prelievo (*interleaving*), per poi ritornare alla stazione di I/O con il carico prelevato.

La possibilità di effettuare cicli *dual command* dipende dalla disponibilità simultanea di richieste di stoccaggio e di prelievo; quando ciò si verifica, l'adozione di cicli *dual command* porta, come riscontrato in letteratura, a significativi risparmi di tempo, dell'ordine del 30%, rispetto ad adottare cicli singoli.

In ottica sostenibile, il focus si sposta dalla minimizzazione del tempo alla riduzione del consumo energetico.

La modalità di sequenziamento più semplice è quella del *first-come first-served* (FCFS); le richieste di stoccaggio, elaborate nella sequenza esatta del loro arrivo, vengono combinate con la prima richiesta di prelievo disponibile, nell'ordine in cui è stata inserita nel sistema informativo.

I prodotti da immagazzinare, generalmente, vengono movimentati da un nastro trasportatore che li conduce alla zona di I/O e quindi si può ritenere fissata la sequenza di stoccaggio; al contrario, le richieste di prelievo sono solo messaggi elettronici, che possono essere ordinati in qualunque sequenza desiderata, consentendo un'ottimizzazione dei cicli combinati.

Come descritto nel paragrafo successivo, il problema nella sua formulazione generale è NP-hard. Numerosi sforzi sono stati compiuti in letteratura con lo scopo di combinare le operazioni di stoccaggio e prelievo per migliorare le prestazioni di tempo, in tempi computazionali adeguati. La prima questione da affrontare è dunque quella di definire un modo efficace per combinare le richieste di stoccaggio e prelievo anche dal punto di vista energy-based.

Le prestazioni di tempo sono strettamente correlate alla politica di assegnazione adottata; Graves et al. (1977) hanno dimostrato, per via analitica e con analisi numeriche, che il massimo risparmio di tempo per un'allocatione dedicata full turnover si ottiene adottando obbligatoriamente ogni qualvolta sia possibile cicli doppi (*mandatory interleaving*) e ottimizzando il tempo di interleaving.

Poiché si è riscontrato in letteratura che per cicli *dual command* il tempo di interleaving copre circa il 30% del tempo totale di ciclo doppio, un'allocatione di tipo full turnover, che permette di minimizzare il tempo di viaggio delle fasi *one-way travel* dalla stazione di input alla locazione di stoccaggio e dalla locazione di prelievo alla stazione di output, è in grado di incidere dunque su una frazione pari al 70% del tempo totale.

Quando si adotta una prospettiva sostenibile, la convenienza deve essere letta in termini di efficienza energetica. Nel proseguo si considererà un'allocatione EBFT (si veda paragrafo 3.3), la quale assegna ai prodotti a più

alta rotazione le posizioni che richiedono minor energia per essere servite. Analogamente a quanto accade dal punto di vista tradizionale del tempo con la politica TBFT per cicli singoli, le prestazioni di energia ottenibili con una politica EBFT rappresentano un limite superiore ai risparmi ottenibili con altre politiche dedicate o con altre politiche di allocazione meno performanti, ma di più facile applicazione, come ad esempio l'allocazione random o l'allocazione per classi (si veda paragrafo 3.5.2).

La seconda questione da affrontare è quella di valutare le prestazioni che si possono ottenere dall'adozione di cicli doppi, per una politica di allocazione EBFT che riduce al minimo i consumi legati al viaggio dalla stazione di input alla locazione di stoccaggio e quelli dalla locazione di prelievo alla stazione di output.

Gagliardi et al. (2012b) hanno recentemente dimostrato che la politica TBFT non è il miglior criterio di assegnazione in termini assoluti per una *locations to product ratio* (LTPR) maggiore di uno, ovvero quando ad un prodotto sono assegnate più locazioni; la politica full turnover degrada rapidamente non consentendo l'ottimizzazione della prestazione temporale. In questo caso, le migliori prestazioni in termini di tempo si ottengono adottando la *closest open location*, ovvero i prodotti vengono, di volta in volta, stoccati nei primi vani liberi disponibili rispetto all'I/O, mentre il prelievo avviene dalle locazioni che richiedono il viaggio più breve dalla posizione del trasloelevatore.

Nel paragrafo 3.6 è stata introdotta la strategia di allocazione dinamica chiamata *best energy open location policy* (BEOL). Con questa politica, un prodotto in ingresso viene stoccato nella locazione libera a consumo energetico minore all'interno della zona dedicata alla classe di appartenenza; analogamente, per la fase di recupero, viene prelevato il prodotto dalla locazione che minimizza l'energia del ciclo di prelievo. E' stato dimostrato come, dal punto di vista sia temporale sia energetico, questa politica surclassi sia la EBFT sia la TBFT.

Alla luce di ciò, la terza questione da affrontare è in che misura l'efficienza energetica dei cicli *dual command* possa essere ulteriormente migliorata con l'adozione di una strategia di allocazione dinamica anziché dedicata.

Viene proposta un'ottimizzazione attraverso l'utilizzo del *Constraint Programming* ibridato con la *Large Neighborhood Search* per combinare in modo ottimale le operazioni di stoccaggio e le richieste di prelievo sia in ottica time based, sia in ottica energy based. Vengono poi analizzate le prestazioni temporali e di energia per differenti geometrie di scaffalatura e per differenti distribuzioni ABC di domanda, similmente a quanto fatto nei precedenti capitoli.

Il capitolo è così organizzato: nel par. 5.2 viene fornita una review della letteratura sul problema del sequenziamento, mentre nel par. 5.3 è proposto un primo approccio *greedy* al problema del sequenziamento energy-based.

Viene poi proposta l'ottimizzazione dei cicli di stoccaggio e prelievo attraverso l'utilizzo del *Constraint Programming* ibridato con la *Large Neighborhood Search* nel par. 5.4; in particolare le equazioni del modello sono descritte nel par. 5.4.2, mentre nel par. 5.4.3 viene descritta la metodologia adottata per la fase di solving e le relative prestazioni. La descrizione degli esperimenti simulativi viene riportata nel par. 5.5; i risultati relativi al confronto delle prestazioni tra cicli singoli e doppi sono riportati nel par. 5.5.1 e 5.5.2. Le conclusioni vengono riassunte infine nel par. 5.6.

5.2 Review della letteratura

Il problema del sequencing è stato affrontato in letteratura dal solo punto di vista time-based. Il miglioramento delle prestazioni temporali ottenibile con l'adozione di cicli doppi dipende dalla capacità di combinare in modo ottimale le richieste di stoccaggio e di prelievo così da ridurre la fase di interleaving.

Per allocazione random con una sola locazione libera disponibile alla volta, Bozer et al. (1990) spiegano che il problema di scheduling dei cicli combinati può essere ricondotto al problema del commesso viaggiatore (TSP), che è noto essere NP-completo. Quando invece si hanno più locazioni disponibili per un'operazione di stoccaggio, il problema consiste nello scegliere la miglior locazione di stoccaggio oltre al miglior accoppiamento tra il prodotto da stoccare e quello da prelevare; il problema in questo caso risulta NP-hard. Per questo motivo sono state sviluppate in letteratura varie euristiche per superare tale complessità, in combinazione con diversi criteri di allocazione.

Attraverso un approccio analitico Han et al. (1987) sostengono che per ottenere un miglioramento della produttività superiore al 10%, il tempo di interleaving, sotto ipotesi di moto rettilineo uniforme, deve essere diminuito di oltre il 50% rispetto a quello dei cicli combinati nella modalità FCFS, come ottenibile adottando la *Nearest Neighbor Heuristic*. Le performance di questa euristica possono essere migliorate con l'adozione di un criterio di allocazione basato su classi piuttosto che un'allocazione di tipo casuale (Eynan and Rosenblatt, 1993).

Soluzioni quasi ottimali possono essere ottenute per l'allocazione random attraverso l'algoritmo ϵ -*optimum* proposto da Lee and Schaefer (1996); per allocazione random e stazione di input e output separate, invece, l'algoritmo iterativo basato su un solver MILP (Mixed Integer Linear Programming) di Tanaka and Araki (2009) si dimostra essere uno strumento efficiente.

Hachemi et al. (2012) definiscono un modello di programmazione intera da applicare step-by-step per l'ottimizzazione di un ciclo doppio alla volta con più locazioni disponibili.

Gagliardi et al. (2013) propongono un adeguamento delle euristiche proposte da Han et al. (1987) e Lee and Schaefer (1996) al caso in cui LTPR >

1, ovvero quando sono disponibili più locazioni per le operazioni di stoccaggio e di prelievo di ogni prodotto. Essi introducono anche una formulazione *mathematical programming* del problema di sequenziamento, ottenendo performance quasi sempre superiori rispetto agli altri metodi per situazioni complesse, come nelle condizioni di applicazione in contesti reali.

Per l'allocazione *duration of stay based shared* (vedi paragrafo 3.1), Chen et al. (2010) sviluppano un metodo euristico per la risoluzione di problemi di piccole dimensioni e un algoritmo *tabu search* per migliorare la soluzione dell'euristica per problemi di medie e grandi dimensioni.

Per le politiche di tipo dedicato, è stata proposta un'euristica $O(n^3)$ da Lee and Schaefer (1997), nel caso di una sola locazione disponibile per lo stoccaggio, con una distanza dalla soluzione ottima del 9%.

Van den Berg and Gademan (1999) hanno studiato il problema del sequenziamento per minimizzare il tempo di viaggio per blocchi di stoccaggi e prelievi con posizioni arbitrarie delle stazioni di input e output, nell'ipotesi di conoscere le locazioni che debbono essere servite. Essi hanno proposto due euristiche basate sulla minimizzazione dell'interleaving con tempi di soluzione polinomiali.

5.3 Euristica greedy per l'ottimizzazione dei cicli combinati in ottica energy based

Una primo approccio al problema di sequencing in un'ottica di gestione energy-based potrebbe essere quello di modificare opportunamente l'euristica time-based proposta da Lee and Schaefer (1997) per allocazione dedicata e $LTPR = 1$. Volendo adottare una politica EBFT con $LTPR > 1$ e un'ottica energy-based, si propone l'euristica descritta di seguito.

Si immagina di elaborare le richieste di stoccaggio nello stesso ordine in cui arrivano (i singoli prodotti da immagazzinare vengono movimentati alla stazione di I/O da un nastro trasportatore); le richieste di prelievo, invece, vengono riordinate al fine di ottimizzare gli accoppiamenti con gli stoccaggi. Per limitare il tempo di calcolo, ma anche per aderire maggiormente ad un ambiente dinamico, l'elenco delle richieste di prelievo viene suddiviso in blocchi da sequenziare uno alla volta. Nel caso in esame, si utilizzano blocchi da 15 stoccaggi e 15 prelievi, combinati in $N = 15$ cicli doppi per volta. Nei calcoli si considerano immutati i blocchi fino a quando tutte le coppie sono state individuate, adottando un approccio statico. In un ambiente molto turbolento, tuttavia, è possibile adottare un approccio dinamico aggiornando il blocco con le nuove richieste di prelievo ad ogni iterazione prima di selezionare la successiva coppia di operazioni, oppure scegliendo dimensioni dei blocchi molto piccole così da affrontare tempestivamente eventuali modifiche degli ordini dei clienti.

Si assume che L_S sia l'elenco delle N richieste di stoccaggio e L_R sia l'elenco delle N richieste di prelievo nei blocchi analizzati.

L'euristica energy-based consiste nei seguenti passi:

1. Assegnare ad ogni elemento di L_S la locazione libera con la minor energia richiesta per immagazzinare il carico. Sia S l'insieme di tali locazioni;
2. Assegnare ad ogni elemento di L_R la locazione di prelievo tra quelle disponibili che richiede la minor energia per portare il carico alla stazione di I/O. Sia R l'insieme di tali locazioni;
3. Per ogni coppia (s, r) , con $s \in S$ e $r \in R$, calcolare il fabbisogno energetico per il passaggio dalla locazione di stoccaggio s alla locazione di prelievo r ;
4. Selezionare la coppia (s', r') , con $s' \in S$ e $r' \in R$, con il minimo fabbisogno energetico ed eseguire il relativo ciclo dual command;
5. Aggiornare $S = S - s'$, $R = R - r'$;
6. Ritornare al punto 4 fino a che $S = \emptyset$ e $R = \emptyset$.

La logica dei punti 1 e 2 è tentare di influenzare positivamente i viaggi da/per la stazione di I/O di un ciclo dual command, in modo tale da consumare la minima energia. I passi dal 3 al 5 provano a minimizzare il fabbisogno energetico di interleaving, che è l'unica componente energetica che cambia, una volta stabilite le locazioni da servire, con una diversa combinazione stoccaggio/prelievo. L'euristica appena descritta è caratterizzata da una complessità $O(N^2 \log_2 N)$. Per attuare il punto 3 dell'euristica, infatti, si possono calcolare gli N^2 valori di energia relativi a tutte le N^2 possibili coppie (s, r) e quindi sceglierne il valore minimo. Tuttavia, se si effettua un ordinamento della lista di lunghezza N^2 , i passi successivi possono essere svolti più rapidamente.

Sia E allora la lista ordinata delle N^2 tuple $(s, r, E_n(s, r))$, dove E_n è l'energia di interleaving associata alla coppia (s, r) , che può essere ottenuta in tempo $O(N^2 \log_2 N^2) = O(N^2 \log_2 N)$.

Per ogni $s \in S$ viene costruita una lista $L(s)$ che punta agli elementi riguardanti s e, analogamente, una lista $L(r)$ che punta agli elementi di $r \in R$; lo step 4 può essere quindi eseguito in tempo costante (la prima cella della lista memorizza il minimo). Le liste $L(s)$ e $L(r)$ sono usate per accedere ad E e rimuovere le celle del tipo (s, \dots, \dots) o (\dots, r, \dots) in tempo $O(N)$. Il ciclo viene ripetuto N volte, quindi la complessità finale risulta essere $O(N^2 \log_2 N + 2N^2) = O(N^2 \log_2 N)$.

Le prove effettuate hanno messo in luce come questa euristica presenti un errore medio dell'8% rispetto all'ottimo matematico, prestazione paragonabile a quella riscontrata per l'euristica time-based di Lee and Schaefer

(1997). Per trarre considerazioni attendibili sulle prestazioni raggiungibili adottando un approccio energy-based, si rende quindi necessario elaborare un modello di sequenziamento che porti ad un errore sensibilmente inferiore, pur mantenendo prestazioni computazionali accettabili.

5.4 Ottimizzazione delle operazioni di stoccaggio e di prelievo

Per limitare i tempi computazionali, ma anche per aderire ad un ambiente dinamico, le liste di stoccaggi e prelievi vengono suddivise comunemente in blocchi, i quali vengono sequenziati uno alla volta (Roodbergen and Vis, 2009). Nelle successive simulazioni si è adottato un approccio statico, considerando immutabile ogni blocco finché non siano state create tutte le coppie di stoccaggi e prelievi. In ambienti molto turbolenti, è tuttavia possibile adottare un approccio dinamico con la ri-ottimizzazione di una nuova sequenza ogni qual volta arrivi una richiesta prioritaria con approccio *rolling*. Un altro modo per essere flessibili è scegliere dimensioni dei blocchi molto piccole, così da considerare nuovi arrivi o eventuali modifiche degli ordini dei clienti il più tempestivamente possibile.

In questo lavoro si è utilizzato l'approccio del Constraint Programming al fine di migliorare l'euristica greedy proposta nel par. 5.3, pur mantenendo tempi di CPU ragionevoli. Inoltre, vengono analizzate due differenti politiche di allocazione: la EBFT e la politica per classi dinamica BEOL (si veda par. 3.6). Per permettere di confrontare le prestazioni del sequenziamento nelle due diverse ottiche di minimizzazione (tempo o energia), il modello viene formulato in modo tale da poter effettuare entrambe le ottimizzazioni attraverso la selezione da parte dell'utente di un opportuno parametro.

5.4.1 Constraint Programming

Il *Constraint Programming* (CP) è una metodologia di programmazione che permette di codificare e risolvere problemi di ottimizzazione mediante l'utilizzo di vincoli (Rossi et al., 2006).

Il CP divide la codifica in due fasi: la fase di modellazione (*modeling*) e la fase di risoluzione (*solving*). Nella prima, il problema viene modellizzato utilizzando vincoli tra le variabili, che possono essere anche di tipo non lineare, cosiccome la funzione obiettivo. Lo sviluppatore può concentrarsi sulla descrizione delle proprietà richieste alla soluzione introducendo relazioni tra le variabili, anziché sulla definizione di un algoritmo per generare la soluzione stessa. Nella fase di solving, infatti, lo sviluppatore può fare affidamento su un risolutore di vincoli (*constraint solver*), che esplora lo spazio ammissibile delle soluzioni alternando passi di assegnamento, in cui alla variabile selezionata viene associato uno dei valori appartenenti al suo dominio, a passi

di propagazione dei vincoli, in cui i valori che non portano a soluzioni ammissibili vengono rimossi dal dominio delle variabili. Decenni di studio sulle migliori strategie di ricerca delle soluzioni sono stati incorporati negli attuali pacchetti software di CP, che offrono dunque solver avanzati.

Come sottolineato in (Banaszak et al., 2009), grazie alla loro espressività i sistemi constraint-based sono particolarmente adatti a modellizzare problemi complessi, come i processi decisionali che un'impresa si trova a gestire nella realtà. Se paragonati ad altre metodologie come gli algoritmi genetici, il simulated annealing o il tabu-search, i modelli CP sono, infatti, molto più facili da modificare e aggiornare, caratteristica che li rende sia rapidamente adattabili a modifiche del contesto per il quale sono stati creati, sia estendibili anche ad altre situazioni simili con minimo tuning.

Per migliorare ulteriormente la capacità di ottenere soluzioni quasi ottime/ottime in tempi computazionali sempre più ridotti, è possibile introdurre delle strategie di ricerca locale dopo aver ottenuto una buona soluzione dal programma CP principale. In particolare, la *Large Neighborhood Search* (LNS), introdotta da (Shaw, 1998), si è dimostrata in grado di ibridare il CP e la *local search* con ottime prestazioni (Van Hentenryck and Michel, 2005).

La LNS consiste in un processo iterativo che, partendo da una soluzione ammissibile, ad ogni iterazione distrugge parte della soluzione corrente utilizzando una data definizione di prossimità e la riottimizza, nella speranza di migliorarla. La *neighborhood procedure* seleziona un sottinsieme di variabili, le cosiddette *free variables*, che devono essere riassegnate, mentre lascia le rimanenti invariate rispetto alla soluzione corrente; la struttura del modello viene preservata, in modo da generare sempre soluzioni ammissibili.

Si è quindi prima modellizzato il *dual command problem*, nella sua forma più generale e complessa, secondo lo spirito del Constraint Programming (par. 5.4.2), per poi risolverlo efficacemente con un approccio ibrido CP + LNS (par. 5.4.3). Si è utilizzato il pacchetto software COMET sia per la fase di modellazione sia per quella di risoluzione.

5.4.2 Il modello

Il modello si propone di combinare i cicli di stoccaggio e di prelievo all'interno di un singolo blocco, in modo tale da minimizzare l'energia o il tempo necessario globalmente per eseguire i relativi cicli doppi.

Il modello è stato concepito per la risoluzione del problema di sequenziamento nella sua forma più generale e complessa, ovvero con $LTPR > 1$; di conseguenza si devono non solamente accoppiare stoccaggi e prelievi in cicli doppi, ma anche selezionare le migliori locazioni dove immagazzinare/prelevare i prodotti.

Si è assunto che lo stesso prodotto non possa avere una richiesta di stoccaggio e di prelievo nello stesso blocco; quando questo si verifica, entrambe le richieste vengono rimosse dalla lista delle transazioni, poiché, in situazioni

Tabella 5.1. Variabili del modello

Nome della variabile		Descrizione
store_loc $[i]$	$\forall i \in [1..n]$	Locazione di stoccaggio per il ciclo dual command i
retr_loc $[i]$	$\forall i \in [1..n]$	Locazione di prelievo per il ciclo dual command i
store_item $[i]$	$\forall i \in [1..n]$	Prodotto da stoccare nel ciclo dual command i
retr_item $[i]$	$\forall i \in [1..n]$	Prodotto da prelevare nel ciclo dual command i
energy $[i]$	$\forall i \in [1..n]$	Energia per svolgere il ciclo dual command i
time $[i]$	$\forall i \in [1..n]$	Tempo per svolgere il ciclo dual command i

reali un carico verrebbe immediatamente prelevato dal convogliatore e non inserito a scaffalatura.

Le variabili considerate nel modello sono riportate nella tabella 5.1, per una data dimensione del blocco n ; le variabili decisionali sono i prodotti da stoccare e prelevare che devono essere accoppiati in ogni ciclo doppio i e le locazioni di stoccaggio/prelievo che devono essere servite; il tempo e l'energia associata a un dato ciclo doppio rappresentano, invece, le variabili ausiliarie del modello.

I dati in ingresso sono riportati nella tabella 5.2.

Tabella 5.2. Dati di input per il modello: n rappresenta il numero di ciclo dual command all'interno di un blocco, P è il numero della classe del prodotto, L è la capacità di stoccaggio della scaffalatura

Input		Descrizione
store_list $[i]$	$\forall i \in [1..n]$	Codice prodotto richiesto i nella lista di stoccaggio
retr_list $[i]$	$\forall i \in [1..n]$	Codice prodotto richiesto i nella lista di prelievo
class $[k]$	$\forall k \in [1..P]$	Classe assegnata al prodotto k dalla politica di stoccaggio
class_assign $[j]$	$\forall j \in [1..L]$	Classe assegnata alla locazione j dalla politica di stoccaggio
inventory $[j]$	$\forall j \in [1..L]$	Stato locazione: 0 se j è vuota, codice prodotto se occupata
Energy $[i, j]$	$\forall i, j \in [1..L] \ i \neq j$	Energia per il ciclo dual command da i a j
Time $[i, j]$	$\forall i, j \in [1..L] \ i \neq j$	Tempo di viaggio del ciclo dual command da i a j

La funzione obiettivo è rappresentata in eq. 5.1, dove il parametro binario **bin** permette all'utente di specificare la prestazione da minimizzare: **bin** deve essere posto a 1 se si vuole ottimizzare il consumo di energia del blocco, a 0 se si vuole, invece, ridurre il tempo complessivo dei cicli.

$$\text{minimize} \quad \text{bin} \cdot \sum_{i=1}^n \mathbf{energy}[i] + (1 - \text{bin}) \cdot \sum_{i=1}^n \mathbf{time}[i] \quad (5.1)$$

I vincoli sono rappresentati in eq. 5.2-5.10 e le variabili sono in grassetto.

$$\mathbf{retr_item}[i] = \mathbf{retr_list}[i] \quad \forall i \in [1..n] \quad (5.2)$$

$$\forall i \in [1..n] \exists j \in [1..n] \text{ s.t. } \mathbf{store_item}[i] = \mathbf{store_list}[j] \quad (5.3)$$

$$\text{class}[\text{store_item}[i]] = \text{class_assign}[\text{store_loc}[i]] \quad \forall i \in [1..n] \quad (5.4)$$

$$\text{inventory}[\text{store_loc}[i]] = 0 \quad \forall i \in [1..n] \quad (5.5)$$

$$\text{inventory}[\text{retr_loc}[i]] = \text{retr_item}[i] \quad \forall i \in [1..n] \quad (5.6)$$

$$\text{energy}[i] = \text{Energy}[\text{store_loc}[i], \text{retr_loc}[i]] \quad \forall i \in [1..n] \quad (5.7)$$

$$\text{time}[i] = \text{Time}[\text{store_loc}[i], \text{retr_loc}[i]] \quad \forall i \in [1..n] \quad (5.8)$$

$$\text{store_loc}[i] \neq \text{store_loc}[j] \quad \forall i, j \in [1..n] \quad i \neq j \quad (5.9)$$

$$\text{retr_loc}[i] \neq \text{retr_loc}[j] \quad \forall i, j \in [1..n] \quad i \neq j \quad (5.10)$$

Per evitare simmetrie nelle soluzioni, si è fissato un ordine alla lista di prelievo, in modo tale che il prodotto prelevato nel ciclo doppio i corrisponda al prodotto nell' i -esima posizione della lista di prelievi (si veda eq. 5.2); il prodotto da stoccare nello stesso ciclo, invece, verrà selezionato dal risolutore tra le richieste di stoccaggio della lista (vedi eq. 5.3). Si è scelto di fissare i prelievi e “rilassare” gli stoccaggi per aumentare la velocità risolutiva; nella lista di stoccaggi, infatti, è facile trovare più prodotti dello stesso tipo essendo essi ordinati a lotti, mentre nella lista di prelievi la variabilità dei prodotti è solitamente maggiore; nel caso questa condizione non sia verificata, tuttavia, è possibile fissare la lista di stoccaggio e rendendo variabile la lista di prelievi semplicemente invertendo le variabili nelle eq. 5.2 e 5.3. Va ricordato, comunque, che l'ordine di esecuzione dei cicli doppi ottenuto dal modello è virtuale e tutti i cicli dual command di ciascun blocco possono essere eseguiti in qualunque ordine, essendo la prestazione complessiva di blocco a venire ottimizzata: essa è dunque indipendente dalla sequenza con cui i cicli stabiliti vengono effettivamente realizzati, poiché le condizioni di input su cui opera il modello si intendono immutate fino alla completa esecuzione dell'intero blocco. Accade spesso nella realtà che i prodotti da stoccare giungano alla stazione di input attraverso un nastro trasportatore e dunque la loro sequenza sia fissata; in questo caso è sufficiente riordinare i cicli proposti dal modello secondo l'ordine di collocazione delle u.d.c. nel nastro.

Il vincolo in eq. 5.4 limita il dominio alle possibili locazioni di ciascun prodotto, a seconda della politica di stoccaggio: con la politica di allocazione

EBFT ogni codice da gestire a magazzino potrà essere collocato esclusivamente nella zona ad esso dedicata, mentre con la politica dinamica BEOL, invece, tutti gli elementi appartenenti ad una determinata classe `class` potranno essere stoccati in qualunque locazione vuota dell'intera zona associata alla classe.

L'eq. 5.5 limita la scelta delle locazioni di stoccaggio alle sole locazioni vuote a magazzino; l'eq. 5.6, invece, collega la scelta della locazione di prelievo alle locazioni effettivamente occupate dal prodotto richiesto. I vincoli in eq. 5.7 e 5.8 assegnano ad ogni coppia di stoccaggio e prelievo i valori di tempo e di consumo energetico del ciclo dual command, calcolati in base ai modelli proposti nel cap. 2. Per applicare il modello, in particolare, è necessario calcolare i tempi e i consumi energetici del trasloelevatore per spostarsi a vuoto da una locazione all'altra all'interno della scaffalatura (tempo ed energia di *interleaving*); si devono poter associare, inoltre, a ciascuna locazione i valori di tempo e di energia per le movimentazioni one-way con carico a bordo dall'I/O alla locazione e dalla locazione all'I/O, per poter completare il calcolo delle prestazioni di ciclo doppio. A tal fine, si è sviluppato un programma in linguaggio C basato sul modello proposto nel cap. 2; per sfruttare, inoltre, le capacità combinatorie della programmazione con vincoli e ridurre i tempi di calcolo data la complessità del problema, sono stati pre-elaborati i valori di tempo ed energia per le diverse scaffalature da analizzare, in modo da ottenere $L(L - 1)$ vettori multidimensionali `Time` e `Energy`, contenenti i tempi ed i valori di energia per tutte le possibili combinazioni di stoccaggio e prelievo all'interno della scaffalatura. Questi vettori vengono poi passati come parametri di input al modello di sequenziamento (eq. 5.7 e 5.8).

Infine, le eq. 5.9 e 5.10 garantiscono la selezione di locazioni di stoccaggio e prelievo tutte differenti per blocco, in modo che i cicli doppi individuati possano essere eventualmente riordinati come desiderato per la loro effettiva realizzazione.

5.4.3 Risoluzione del problema con Constraint Programming e Large Neighborhood Search

Si è inizialmente risolto il problema di sequenziamento ottenendo la soluzione matematicamente ottima mediante gli algoritmi di ricerca predefiniti incorporati nel pacchetto COMET. Data la complessità del problema, ampiamente discussa in letteratura (par. 5.2), questa fase, che ha richiesto un enorme dispendio di risorse sia in termini di capacità di calcolo impegnata che di tempi computazionali, si è resa tuttavia necessaria per poter valutare successivamente le prestazioni dell'approccio risolutivo proposto; essa ha permesso inoltre di valutare in che modo la dimensione del blocco influenzi le performance tempo/energia del sistema.

Si sono quindi generate delle liste di prelievo di 360 richieste, create in base alla distribuzione della domanda (curva ABC 20-50 o 20-80), per 100

differenti prodotti con domanda decrescente. Si è considerata una situazione di magazzino iniziale e delle liste di stoccaggi basati su una politica di reorder point con lotto di rifornimento pari all'EOQ di prodotto. Sono state prese in esame due differenti scaffalature aventi entrambe 990 locazioni, con $LTPR \approx 10$ mediamente, la quale cresce fino a 17 per i prodotti di classe A.

Le liste di stoccaggi e prelievi corrispondenti ad una finestra temporale sono state suddivise in un differente numero di blocchi in base alla dimensione di blocco n esaminata; i blocchi sono stati quindi ottimizzati in sequenza.

Un primo problema da affrontare è valutare come impatti la dimensione del blocco sia sul consumo totale di energia di una finestra temporale, sia sui tempi di CPU. L'aumento delle dimensioni del blocco permette al risolutore di poter ottimizzare più combinazioni di cicli alla volta e dunque è presumibile ottenere valori di prestazione globalmente migliori rispetto a blocchi di dimensione inferiore, a scapito tuttavia di tempi computazionali maggiori.

Si sono elaborate 12 liste differenti di stoccaggi e prelievi, per un totale di 4320 cicli doppi, divisi in blocchi di dimensioni pari a 8, 9, e 10. Non sono stati considerati blocchi di dimensione superiore, a causa degli elevati tempi di risoluzione non compatibili con le risorse a disposizione.

L'aumento medio di energia totale, dovuto all'utilizzo di blocchi di dimensione pari a 8, rispetto a blocchi di dimensione 9, è di circa 0,40% con deviazione standard pari a 0,228%; cresce invece a 0,52% con deviazione standard di 0,231% se il confronto viene fatto con blocchi di dimensione 10. L'aumento delle dimensioni dei blocchi comporta dunque lievi miglioramenti delle prestazioni, mentre i tempi di calcolo crescono drasticamente, passando da una media di 0,20 ore per blocchi di dimensione 8, a 2,08 ore per blocchi di dimensione 9, fino a 20,9 ore per blocchi di dimensione 10, adottando una macchina AMD Opteron 2GHz Linux.

Il numero e la posizione delle locazioni assegnate a ciascun prodotto, funzioni del tipo di strategia di assegnazione, curva di domanda e situazione del magazzino, impattano sul numero di potenziali scelte durante la ricerca ed incidono sui tempi di calcolo. Per la politica EBFT e per dimensione del blocco pari a 8, un aumento delle dimensioni delle zone dedicate ai prodotti più frequentemente movimentati (classe A) pari al 50% porta ad un aumento medio del tempo di CPU del 92%. Si ottiene un aumento del 446% del tempo di CPU quando si passa dalla scaffalatura con 99 colonne e 10 livelli a quella sviluppata più verticalmente con 45 colonne e 22 livelli, a causa delle maggiori differenze tra i valori di energia delle varie locazioni nella scaffalatura a sviluppo orizzontale, che consente al risolutore di tagliare grandi porzioni dello spazio di ricerca.

In situazioni reali non è possibile pensare di ottenere l'ottimo matematico del problema di sequenziamento dei cicli doppi a causa degli elevati tempi di elaborazione. Per le scaffalature con 990 locazioni analizzate, una stima approssimata del tempo medio di ciclo doppio può essere calcolata, sulla base dei risultati della letteratura (par. 5.1), come il 70% di un doppio ciclo

singolo, che, per questa analisi, corrisponde a 28 s; pertanto, per eseguire 10 cicli doppi possiamo supporre che il trasloelevatore impieghi circa 280 s, tempo che deve essere superiore al tempo necessario per elaborare la sequenza successiva di cicli da realizzare. Diventa quindi chiara l'inapplicabilità della ricerca dell'ottimo assoluto e nasce l'esigenza di adottare un approccio euristico che, rinunciando alla certezza dell'ottimo matematico, tuttavia si avvicini notevolmente ad esso in tempi computazionali accettabili per una reale applicazione del modello.

Si è scelto di ibridare il Constraint Programming con la Large Neighborhood Search, in quanto tale approccio risolutivo richiede modifiche minime al codice CP del modello e permette alla ricerca locale di esplorare zone abbastanza grandi da evitare la necessità di meta-euristiche, come nel tabu search.

Dopo aver ottenuto una buona soluzione di partenza dal programma CP principale, una parte delle variabili della soluzione ottenuta vengono liberate, mentre le restanti rimangono istanziate ai valori ottenuti nella soluzione precedente (si veda par. 5.4.1); il problema così ristretto viene ri-ottimizzato usando il CP con un limite sul numero di fallimenti. Le variabili liberate sono circa il 20% e vengono scelte casualmente tra le variabili di stoccaggio e di prelievo (**store**[i] e **retr**[i], $i \in [1..n]$).

Nella LNS standard, dopo ogni ripartenza il solver impone il vincolo implicito di migliorare il valore della funzione obiettivo rispetto alla miglior soluzione fino ad allora trovata; questo potrebbe in taluni casi risultare troppo restrittivo, poiché potrebbe impedire di esplorare regioni dello spazio di ricerca che contengono invece buone soluzioni.

Il COMET offre la variante *lnsOnFailure(nbFailures, nbStable, nbStarts)* che consente il superamento di questo problema; con tale metodo viene eseguita un'iterazione LNS ogni qual volta il numero di fallimenti raggiunge *nbFailures* (50 nel nostro caso). Le iterazioni LNS continueranno fino a quando la funzione obiettivo risulterà non migliorabile per *nbStable* iterazioni consecutive (5 nel nostro caso); a questo punto, sarà eseguito un riavvio più radicale, ovvero non verrà impostato nessun vincolo implicito alla funzione obiettivo, ammettendo dunque un potenziale degrado con conseguente migliore diversificazione. La ricerca terminerà dopo *nbStarts* (pari a 10) riavvii.

Alla fine, la miglior soluzione trovata durante l'intero processo di ricerca viene ripristinata. Dal momento che una combinazione ben bilanciata della procedura di rilassamento delle variabili e del limite di fallimenti dovrebbe, idealmente, portare a circa lo stesso numero di riavvii per ciascuna causa (Van Hentenryck and Michel, 2005), è stato introdotto un adattamento dinamico del limite di fallimenti LNS in base alla causa dell'ultimo riavvio, aumentandone il valore del 10% in caso il riavvio sia stato causato dal raggiungimento del limite di fallimenti e riducendolo del 10% se sia stato innescato, invece, dal completamento della ricerca.

Per valutare le prestazioni del modello LNS proposto, si è considerato come riferimento la dimensione del blocco pari a 10 e si è valutato il consumo energetico totale e il tempo di CPU rispetto alla soluzione ottima trovata precedentemente. I risultati ottenuti si discostano mediamente di solo 0,29% dalla soluzione ottima, con una deviazione standard dello 0,11%. Il tempo medio di CPU per un blocco da 10 passa da 20,9 ore per la procedura di minimizzazione a circa 58 s con deviazione standard di 38 s per l'approccio CP+LNS, un valore assolutamente accettabile rispetto al tempo necessario al trasloelevatore per completare tutti i cicli doppi del blocco.

L'influenza legata all'aumento della dimensione delle zone dedicate ai prodotti più frequentemente movimentati (classe A) risulta inferiore a quella riscontrata per la risoluzione ottima: per un aumento del 50% delle dimensioni delle zone si è ottenuto un aumento del 35,5% del tempo di CPU, mentre passando dalla scaffalatura 10×99 a quella 22×45 più sviluppata verticalmente i tempi di CPU aumentano di 11,6%.

L'approccio ibrido CP + LNS risulta dunque avere prestazioni sia in termini di errore che di tempi computazionali molto buone, tanto da poter essere effettivamente applicato anche in contesti reali. Adottando questo modello è dunque possibile valutare i risparmi di tempo e di consumo energetico ottenibili in un AS/RS, quando si combinino gli stoccaggi con le richieste di prelievo in cicli dual command e con criteri di allocazione differenti, come riportato nel paragrafo seguente.

5.5 Esperimenti simulativi

Per valutare l'impatto dei cicli *dual command* sul fabbisogno energetico e sul consumo di tempo, si sono effettuate delle simulazioni sotto le seguenti ipotesi:

- 100 differenti prodotti di peso 1000 kg con domanda strettamente decrescente;
- tutte le locazioni hanno la stessa dimensione ($l = 1, 2$; $h = 1, 4$) e possono immagazzinare qualsiasi tipo di prodotto;
- la capacità della scaffalatura considerata è di 990 unità di carico;
- le unità di carico entranti e uscenti sono trasferite allo stesso punto di I/O, posto nell'angolo in basso a sinistra della scaffalatura;
- la frequenza di domanda (λ) di ciascun codice è nota e costante nel tempo;
- si adotta una politica di rifornimento di tipo *reorder-point* con dimensione del lotto pari all'Economic Order Quantity (EOQ), considerando

un medesimo rapporto dei costi di gestione a scorta e di emissione dell'ordine per tutti i codici, in modo da evitare di introdurre fattori di disturbo legati alle diverse politiche di supply.

Poiché la distribuzione di domanda ha un significativo impatto sulle prestazioni energetiche dei cicli singoli (si veda par. 3.3), sono state analizzate due differenti curve di domanda, una distribuzione ABC dei prodotti 20-50 ed una 20-80, in base alle quali si sono create due liste di 7000 richieste di prelievo ciascuna.

Il magazzino è stato supposto inizialmente completamente pieno (riempito in base alla politica di stoccaggio selezionata) e man mano svuotato con cicli singoli di prelievo fino a che non siano state generate delle richieste di stoccaggio a causa dell'azzeramento della giacenza del codice; da tale momento in poi si è considerata la possibilità di creare cicli doppi. Al fine di avvicinarsi il più possibile ad un contesto reale, i cicli combinati sono stati effettuati obbligatoriamente ogni qualvolta fossero contemporaneamente presenti richieste di stoccaggio e prelievo (*mandatory interleaving*) con una dimensione del blocco variabile fino ad un massimo di 10 cicli; sono stati eseguiti invece cicli singoli di prelievo e stoccaggio ogni qualvolta questo si è reso necessario.

Sono stati lanciati circa 1500 prelievi iniziali, considerati come un "warm up", con l'obiettivo di creare un'iniziale coda di prodotti da stoccare e ottenere una configurazione iniziale di magazzino con circa il 50% di giacenza, che risentisse opportunamente della politica di assignment adottata. Il rilevamento delle prestazioni di tempo ed energia per i vari cicli combinati e singoli sono quindi stati effettuati a valle del periodo di warm-up. La percentuale di cicli doppi rispetto al totale dei cicli creati è risultata pari a circa l'80% per entrambe le distribuzioni; il numero e le dimensioni dei blocchi vengono riportati in fig. 5.1.

Per le simulazioni si è utilizzato un computer MS Windows 8, 64 bit, Intel Core i7-3537U, 8 GB RAM, ottenendo per la politica dinamica BEOL un tempo medio di calcolo di 30 s per blocchi di dimensione 10 e tempi ancor più bassi per la politica EBFT, in cui la scelta delle locazioni insiste su un numero inferiore di possibili soluzioni rispetto alla disponibilità nelle zone dedicate a intere classi.

Poiché il consumo energetico, come già visto in precedenza, è strettamente correlato alle specifiche del trasloelevatore installato, il quale viene selezionato principalmente in base all'altezza della scaffalatura da servire, si sono confrontate le prestazioni di un magazzino automatizzato molto sviluppato orizzontalmente con 99 colonne e 10 livelli con uno maggiormente sviluppato verticalmente, caratterizzato da 45 colonne e 22 livelli per un totale di 990 posizioni disponibili in entrambi i casi; le specifiche dei trasloelevatori utilizzati per servire queste due scaffalature sono le medesime riportate in tabella 3.1.

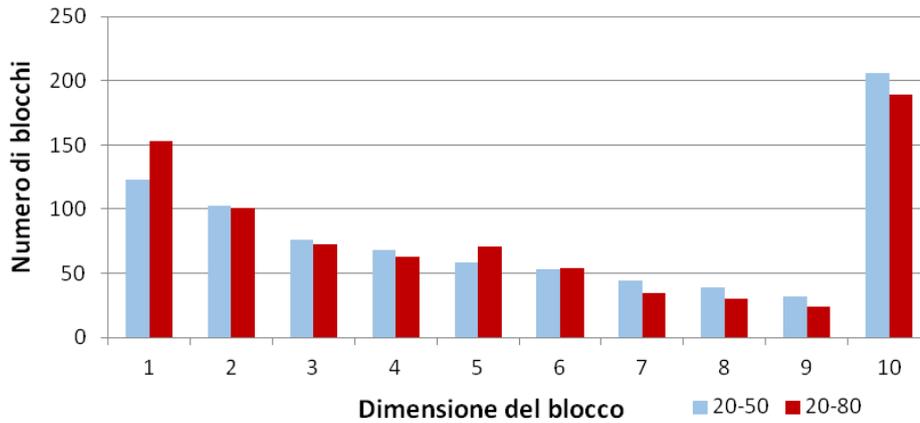


Figura 5.1. Distribuzione delle dimensioni dei blocchi nei cicli dual command per le curve ABC di domanda 20-50 (in azzurro) e 20-80 (in rosso).

I cicli doppi possono essere ottimizzati sia dal punto di vista temporale, come nei modelli tradizionali, sia dal punto di vista energetico secondo la i nuovi principi di sostenibilità. Al fine di valutare i potenziali risparmi di tempo e di energia nelle due differenti prospettive, l'obiettivo di sequenziamento è stato considerato come un ulteriore fattore da analizzare negli esperimenti.

I confronti di tempo e di energia tra i cicli single command e dual command per il criterio di allocazione EBFT e per la politica BEOF sono riportati nel par. 5.5.1, mentre nel par. 5.5.2 sono riportati i risultati dell'analisi fattoriale condotta.

Nel seguito, al fine di confrontare diverse distribuzioni di domanda (che portano alla generazione di diverse richieste di recupero e di stoccaggio e diverse dimensioni dei blocchi) si è considerata come misura di prestazione il tempo medio e l'energia media richiesta per eseguire una singola operazione, ovvero imputando un'operazione ad ogni ciclo singolo e due ad ogni ciclo doppio.

5.5.1 Confronto tra cicli singoli e doppi

Adottando una politica energy-based full turnover (EBFT) i prodotti più frequentemente movimentati vengono assegnati alle migliori zone della scaffalatura in termini di consumo energetico; per questa tipologia di allocazione, in tab. 5.3 vengono riassunti i risultati delle simulazioni condotte. Vengono rappresentati i valori medi di tempo ed energia di singola operazione, nel caso in cui la simulazione venga condotta eseguendo esclusivamente cicli sin-

Tabella 5.3. Tempo ed energia richiesta per operazione per la politica energy-based full turnover

Scaff.	Domanda	Sequencing	Single command		Dual command	
			Tempo[s]	En.[kJ]	Tempo[s]	En.[kJ]
10×99	20-50	Time	34,21	548,17	23,42	396,15
		Energy	35,27	547,83	24,69	386,72
	20-80	Time	26,86	427,62	19,32	321,01
		Energy	27,55	427,28	20,24	313,03
22×45	20-50	Time	38,44	545,29	25,17	391,99
		Energy	38,73	544,11	27,08	388,86
	20-80	Time	32,61	430,66	21,97	316,13
		Energy	33,04	429,25	23,59	314,49

goli e nel caso in cui, dove possibile, le operazioni vengano accoppiate in cicli doppi con l'ottimizzazione CP+LNS proposta nei paragrafi precedenti.

Si è ottenuto mediamente un risparmio del 30,5% sul tempo e del 27,5% sul consumo di energia per ogni operazione, grazie all'ottimizzazione dei cicli dual command rispetto all'adozione di cicli singoli. Va ricordato che tali risultati sono stati ottenuti sotto l'ipotesi di *mandatory interleaving*, il che significa che nella simulazione non sono presenti solamente blocchi di cicli doppi, ma quest'ultimi sono intervallati da cicli singoli qualora non vi siano richieste contemporanee di stoccaggio e prelievo; la dimensione del blocco è variabile da un minimo di 1 ad un massimo di 10 combinazioni di prelievo/stoccaggio. Se consideriamo la situazione ideale, ovvero il caso di poter eseguire esclusivamente cicli dual command con la massima dimensione del blocco (pari a 10), i miglioramenti ottenibili crescono al 33,9% per il tempo e 32,7% per l'energia.

I cicli di doppi risultano quindi un modo efficace per migliorare sia il livello di servizio che l'efficienza energetica nei magazzini automatizzati.

Con la politica best energy open location (BEOL), la scaffalatura viene divisa in tante zone quante le classi dei prodotti. Per cicli single command, un prodotto in ingresso viene stoccato nella locazione libera a consumo energetico minore all'interno della classe di appartenenza; analogamente, per la fase di recupero, viene prelevato il prodotto dalla locazione che minimizza l'energia del ciclo di prelievo. Quando vengono eseguiti cicli doppi, i prodotti vengono stoccati e prelevati, all'interno della classe di appartenenza, in modo tale da minimizzare il tempo o l'energia per uno specifico blocco di richieste. I risultati, per le stesse liste di prelievo della politica EBFT, sono riportati nella tab. 5.4.

La riduzione media di tempo ed energia, passando da cicli single command al mandatory interleaving per la politica BEOL è pari rispettivamente al 28,8% e al 26,3%; analizzando solamente i cicli dual command con blocchi di dimensione pari 10, i benefici crescono al 31,3% per il tempo e al 29,6%

Tabella 5.4. Tempo ed energia richiesta per operazione per la best energy open location policy

Scaff.	Domanda	Sequencing	Single command		Dual command	
			Tempo[s]	En.[kJ]	Tempo[s]	En.[kJ]
10×99	20-50	Time	27,65	472,31	18,68	348,59
		Energy	29,56	449,74	21,76	324,76
	20-80	Time	19,64	310,15	14,30	247,64
		Energy	20,97	292,29	16,18	226,10
22×45	20-50	Time	30,91	469,72	20,41	339,27
		Energy	33,76	446,28	24,24	297,40
	20-80	Time	23,59	306,35	16,24	244,83
		Energy	25,02	291,95	18,57	211,04

per l'energia.

Osservando i valori assoluti di tempo e di energia per operazione, è evidente come il massimo miglioramento delle prestazioni può essere ottenuto dal mandatory interleaving combinato con l'adozione della politica di stoccaggio BEOL.

5.5.2 Analisi fattoriale

Viene effettuata un'analisi fattoriale del tipo 2^4 degli esperimenti simulativi, al fine di valutare il diverso impatto dei quattro fattori che si suppongono influenzare le prestazioni del mandatory interleaving: la geometria della scaffalatura (S), la distribuzione di domanda (C), l'obiettivo di sequenziamento (O), e la politica di allocazione (A). Gli effetti principali e le interazioni tra i fattori sono riportati in fig. 5.2, relativamente alle prestazioni di tempo e di energia passando dal livello basso dei fattori (scaffalatura 10×99 , curva di domanda 20-50, minimizzazione del tempo come obiettivo e politica EBFT) al livello alto (scaffalatura 22×45 , curva di domanda 20-80, minimizzazione energia e politica di allocazione BEOL).

Dall'analisi fattoriale si nota che gli effetti di interazione dei fattori risultano trascurabili e che il maggiore impatto sulle variabili di risposta si ottiene dal criterio di allocazione. Passando dalla politica dedicata EBFT alla strategia dinamica BEOL, si ottengono 5 s di riduzione dei tempi e 86 kJ di risparmio energetico per operazione, pari rispettivamente al 24,47% e al 27,71% del fabbisogno medio per operazione. Questo forte impatto può essere spiegato considerando che, come riportato in letteratura, il criterio di allocazione influisce sulle prestazioni della porzione principale del ciclo dual command, ovvero agisce sul viaggio a carico dalla/alla stazione I/O. Inoltre, come sottolineato dai recenti risultati (vedi par. 3.6), le prestazioni ottenibili dalle tradizionali politiche full turnover degradano quando $LTPR > 1$ e, nelle simulazioni condotte, i prodotti di classe A hanno mediamente $LTPR = 17$.

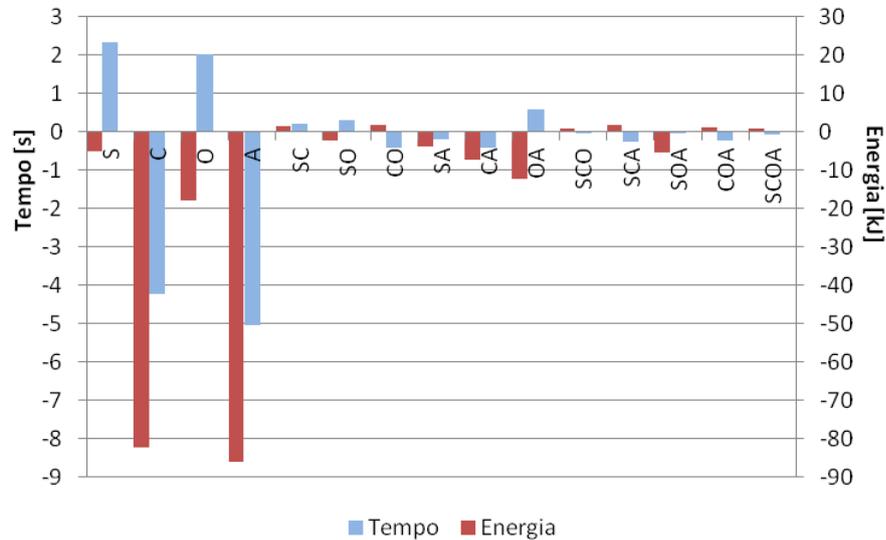


Figura 5.2. Effetti principali e di interazione dei fattori geometria della scaffalatura (S, da 10×99 a 22×45), curva di domanda (C, da 20-50 a 20-80), obiettivo del sequenziamento (O, dalla minimizzazione del tempo a quella dell'energia) e politica di allocazione (A, da EBFT a BEOL), per le prestazioni di tempo (in azzurro) e di energia (in rosso).

Il criterio di allocazione dinamica permette dunque di sfruttare appieno i benefici dei cicli dual command: i viaggi a carico sono ottimizzati in quanto la strategia BEOL permette di scegliere le posizioni migliori all'interno dell'intera classe di appartenenza del prodotto e non solamente tra un insieme limitato di celle come accade per la politica dedicata, mentre l'ottimizzazione della fase interleaving può essere condotta su un insieme maggiore di locazioni di stoccaggio e prelievo, consentendo di sfruttare maggiormente le capacità combinatorie del modello proposto. L'effetto sulle prestazioni ottenibili dalla politica di stoccaggio è sensibile al tipo di ottimizzazione scelto, come sottolineato dall'effetto di interazione ottenuto tra il criterio di allocazione e l'obiettivo di sequenziamento (OA in Fig. 5.2), che risulta il più elevato tra gli effetti secondari.

Il secondo fattore in ordine di importanza per influenza sulle prestazioni risulta essere la distribuzione di domanda, sia per il tempo che per l'energia. Spostandosi dalla distribuzione ABC 20-50 alla 20-80, si ottiene un miglioramento di 4,2 s e un risparmio energetico di 82 kJ; questi valori corrispondono al 20,49% del tempo medio per operazione e al 26,45% del consumo energetico medio per operazione. Similmente a quanto ottenuto nel cap. 3, se ne deduce che possono essere ottenuti significativi miglioramenti attribuendo in modo opportuno i prodotti ai vari fronti di scaffalatura presenti nel

magazzino, in modo da ottenere curve di domanda il più possibile ripide.

Per quanto riguarda l'impatto dell'obiettivo di sequenziamento, adottando la prospettiva di minimizzazione dell'energia si è ottenuto un peggioramento del tempo di singola operazione pari a 9,8% e un risparmio energetico del 5,76%. La diversa magnitudine dell'effetto del fattore sulle prestazioni è spiegabile considerando che l'energia è legata al tempo dalla potenza; quando si minimizza il tempo, per tanto, si riduce implicitamente anche la maggior parte del consumo energetico; la quantità di energia che può essere ulteriormente risparmiata passando ad una ottimizzazione energy-based è dovuta al fatto che il fabbisogno energetico è dato dalla somma dei consumi per i movimenti orizzontali e verticali, mentre per il calcolo del tempo un movimento è sempre nascosto a causa della contemporaneità delle traslazioni e alla conseguente adozione della metrica di Chebyshev. Nei trasloelevatori di nuova generazione dove i movimenti orizzontale e verticale non solo avvengano simultaneamente, ma finiscano anche nello stesso istante, il profilo di velocità (si veda par. 2.2) del moto più veloce, nascosto per il calcolo del tempo, viene modificato al fine di completare la traslazione nello stesso tempo del movimento più lento, portando ad una significativa riduzione dell'energia richiesta in confronto allo spostamento più lento, che avviene a velocità/accelerazione nominale; ciò determina un minor impatto dell'obiettivo del sequenziamento sul risparmio energetico, di quanto non avvenga per la prestazione tempo.

Laddove è possibile adottare cicli dual command, le aziende dovrebbero dunque scegliere se ottimizzare il tempo o l'energia sulla base del vantaggio competitivo che deriva da un maggior livello di servizio offerto al cliente o dai minori costi di approvvigionamento e benefici ambientali legati all'efficienza energetica. Tale trade-off, tuttavia, può essere gestito con un opportuno compromesso, dato che l'ottimizzazione time-based dei cicli doppi porta comunque a significativi risparmi energetici rispetto all'adozione di cicli singoli; risulta quindi possibile adottare una politica di allocazione energy-based, al fine ottimizzare dal punto di vista energetico i viaggi a carico da e per la stazione di I/O, e un sequenziamento time-based al fine di ottimizzare il tempo di interleaving di ogni ciclo dual command, così da migliorare la risposta al cliente.

La geometria della scaffalatura influenza in modo opposto e con diverso valore dell'effetto le prestazioni di tempo e di energia. Passando dalla scaffalatura sviluppata orizzontalmente a quella più verticale, il tempo peggiora di 11,36%, mentre il consumo energetico si riduce di 1,70%. Si deve infatti considerare che nelle scaffalature a sviluppo verticale i prodotti tendono a occupare posizioni più elevate per sfruttare la forza peso in discesa, come dimostrato nel cap. 3; le traslazioni verticali dunque diventano più significative, ma la velocità raggiungibile è molto inferiore rispetto a quella in orizzontale (si veda tab. 3.1) e ne consegue dunque un netto peggioramento della prestazione tempo. Dal punto di vista della prestazione energetica,

invece, i minori percorsi orizzontali, lungo i quali deve essere vinta l'inerzia dell'intera struttura del trasloelevatore e del carico, unitamente al maggior sfruttamento dell'effetto positivo della gravità in fase di discesa nella scaffalatura a sviluppo verticale, rendono più simile il consumo energetico associato alle due scaffalature; è tuttavia possibile ancora registrare un minor fabbisogno energetico complessivo per la 22×45 , sottolineando così l'opportunità di sfruttare lo spazio verticale non solamente per ottimizzare l'occupazione a pavimento, ma anche per migliorare le prestazioni energetiche dello stesso AS/RS.

Le due scaffalature analizzate presentano fattori di forma diversi: la scaffalatura 22×45 ha un fattore di forma pari a 0,74, appartenente all'intervallo $([0,6 .. 1])$ indicato in letteratura da Eynan and Rosenblatt (1993) come l'intervallo dove le prestazioni di tempo rimangono piuttosto costanti per una data distribuzione di domanda e numero di classi, mentre la scaffalatura 10×99 ha un fattore di forma pari a 0,44, rientrante nel range dove le prestazioni variano più significativamente. Mentre l'impatto dello shape factor sulla prestazione di tempo si è rivelato in linea con quanto riscontrato in letteratura, le prestazioni energetiche del sistema sembrano non esserne particolarmente influenzate; ne deriva che il fattore di forma della scaffalatura ha un ruolo molto meno condizionante per la prospettiva sostenibile di quanto non lo sia nella tradizionale ottica di minimizzazione del tempo.

5.6 Conclusioni

In questo capitolo è stato proposto un modello di ottimizzazione, basato sul Constraint Programming ibridato con il Large Neighborhood Search, che permette di risolvere il problema di sequenziamento dei cicli doppi di un AS/RS nella sua formulazione più generale e complessa. Le ottime prestazioni in termini di tempi computazionali e la minima distanza dalla soluzione ottima, rendono il modello uno strumento efficace per combinare le richieste di stoccaggio e prelievo al fine di minimizzare il tempo o l'energia.

I risultati della simulazione indicano che l'adozione del mandatory interleaving invece di soli cicli singoli, non solo porta a ridurre il tempo per operazione, ma aumenta considerevolmente anche l'efficienza energetica dell'AS/RS.

I fattori che influenzano più significativamente le prestazioni dei cicli doppi si sono rivelati essere la politica di stoccaggio e la distribuzione della domanda; in accordo con i recenti risultati della letteratura, la politica di allocazione dinamica supera la strategia dedicata, dato che le posizioni migliori sono rese disponibili ad una maggiore gamma di prodotti e l'ottimizzazione avviene su più celle disponibili.

Curve di domanda ripide portano a migliori performance sia di tempo che di energia, dato che le migliori posizioni all'interno della scaffalatura pos-

sono essere interessate da un numero maggiore di operazioni; risulta dunque importante distribuire in modo opportuno i prodotti nelle varie scaffalature del sistema.

In conclusione, i cicli dual command sono un modo efficace per perseguire l'efficienza energetica negli AS/RS; anche adottando un'ottimizzazione time-based, l'energia si riduce drasticamente in confronto all'utilizzo di cicli single command. Qualora il consumo di energia rappresenti, tuttavia, l'obiettivo primario, al fine di ridurre i costi di approvvigionamento energetico e promuovere una immagine "verde" dell'azienda, allora le migliori prestazioni possibili si ottengono combinare una politica di allocazione dinamica energy-based con un'ottimizzazione energy-based del sequenziamento dei cicli dual command.

Capitolo 6

Ottimizzazione sostenibile della configurazione di sistema

In questo capitolo si propone un nuovo strumento di supporto decisionale alla progettazione degli automated storage and retrieval systems. Con l'obiettivo di promuovere soluzioni sostenibili, vengono prese in considerazione, attraverso due modelli separati, la prospettiva economica e quella ambientale. Tali modelli possono essere utilizzati per identificare i possibili compromessi o considerare i differenti obiettivi degli stakeholders coinvolti. Al fine di ridurre il gap tra pratica progettuale, disponibilità dei componenti sul mercato e i modelli matematici di progettazione esistenti, il modello proposto si basa su una descrizione realistica della struttura della scaffalatura, in termini di configurazioni delle baie e componenti. Viene considerato, per la prima volta nei modelli di progettazione degli AS/RS, il consumo di energia per i movimenti del trasloelevatore, con relativo impatto sui costi e le sulle emissioni di anidride carbonica. Si è adottato il *Constraint Programming* al fine di gestire la non linearità dei vincoli e della funzione obiettivo.

6.1 Introduzione

La maggior parte della letteratura sui magazzini automatizzati si è concentrata sui criteri di controllo del sistema (si vedano le review di Baker and Canessa (2007); Gu et al. (2007); Roodbergen and Vis (2009); Gagliardi et al. (2012a)), mentre poca attenzione è stata, invece, riservata alla progettazione del sistema (Gu et al., 2010), nonostante i costi dell'investimento siano molto elevati e future riconfigurazioni difficilmente applicabili. Nei modelli di progettazione esistenti non viene inoltre considerato il concetto di *low-carbon logistics* al fine di promuovere soluzioni sostenibili. Nasce dunque la necessità di sviluppare una nuova metodologia di progettazione per gli

AS/RS che consideri il paradigma della *sustainable logistics*, tenendo conto sia delle prestazioni economiche che ambientali.

Il capitolo è organizzato come segue: nel par. 6.2 viene esaminata la letteratura sui modelli esistenti di progettazione degli AS/RS; nel par. 6.3 viene proposto un modello di progettazione sostenibile con variabili decisionali, funzioni obiettivo e vincoli espliciti nei paragrafi 6.3.1- 6.3.4. I risultati del modello applicato ad un caso di riferimento sono discussi nel par. 6.4, mentre le conclusioni vengono riassunte nel par. 6.5.

6.2 Review della letteratura

Il primo modello per la progettazione di un AS/RS sviluppato in letteratura è quello di programmazione non lineare intera mista proposto da Karasawa et al. (1980), che considera l'intero magazzino come ripetizione di un singolo modulo, composto da un trasloelevatore che scorre lungo un corridoio tra due fronti di scaffalatura. Questo modello identifica l'altezza e la lunghezza del magazzino e il corretto numero di trasloelevatori per minimizzare il costo totale, dato dalla somma del costo della scaffalatura (funzione dell'altezza del magazzino), del costo dei trasloelevatori, del costo del terreno e dei costi di costruzione (fondamenta, tetto, pareti), mentre sono stati omessi i costi operativi. Non sono stati introdotti vincoli sulla capacità portante di correnti (beams) e montanti (frames) e non sono presenti restrizioni sull'area occupabile dal magazzino; l'unico vincolo considerato è la capacità di movimentazione delle macchine per stoccare e prelevare i carichi.

A differenza del modello proposto da Karasawa et al. (1980), che considera cicli single command, Ashayeri et al. (1985) considerano cicli dual command e introducono i costi operativi come somma del costo di manutenzione e del costo di order picking, che viene fissato pari allo stipendio annuo del personale impiegato nella riconfigurazione degli ordini dei clienti a partire dalle u.d.c. prelevate; vengono introdotti ulteriori costi quali quelli del nastro trasportatore e dei buffer di I/O. L'impatto economico della scaffalatura viene calcolato in funzione del solo numero di posti pallet, mentre la funzione obiettivo ha come unica variabile, una volta che l'altezza dell'edificio sia stata fissata, il numero di trasloelevatori.

Bozer and White (1990) si focalizzano sui miniload AS/RS e propongono un algoritmo di progettazione che mira a ridurre il numero di corridoi, soddisfacendo due vincoli di capacità: la produttività e lo spazio di stoccaggio; gli autori ipotizzano che il maggior contributo al costo complessivo del sistema sia da attribuire ai trasloelevatori e ai picker.

Rosenblatt et al. (1993) cercano di superare le limitazioni dei modelli di simulazione esistenti alternando fasi di ottimizzazione e di simulazione al fine di ottenere il miglior design per un dato livello di servizio; dai molteplici esperimenti gli autori concludono che un design ottimale richiede il minor

numero possibile di trasloelevatori. Il modello di ottimizzazione proposto può considerarsi un'estensione di quello presentato da Ashayeri et al. (1985): i costi operativi sono dati dalla somma dei costi di manutenzione e degli stipendi del personale, i costi di impianto comprendono il trasloelevatore con le guide di corsa e la scaffalatura (costo considerato fisso, non funzione dell'altezza), mentre i costi di costruzione annoverano i costi del terreno e dell'edificio (valutati considerando solo le dimensioni dei posti-pallet e i costi al metro quadro).

Lee et al. (2005) propongono un modello di AS/RS con scaffalature composte da celle modulari, che possono immagazzinare unità di carico di diversa dimensione. La funzione obiettivo consiste nel minimizzare lo spazio totale perso all'interno di ogni cella; tale obiettivo, a differenza degli studi precedenti, viene perseguito prefissando un budget di investimento e identificando la migliore soluzione in termini di utilizzo dello spazio.

Lerher and Potrč (2006) hanno studiato configurazioni di AS/RS sia con singolo corridoio che con più corridoi, proponendo un approccio strutturato volto alla minimizzazione del costo totale, risolto poi mediante algoritmi genetici. Il modello si sviluppa secondo diverse fasi: nella prima, viene determinata la configurazione della zona di stoccaggio, considerando le dimensioni del posto pallet, la struttura della scaffalatura e la sua capacità; nella seconda fase viene progettata la zona di movimentazione, con la scelta della tipologia single- o multi-aisle AS/RS e dei trasportatori in funzione della capacità produttiva; infine il costo totale viene calcolato come la somma del costo dell'investimento statico (terreno, pareti e tetto dell'edificio), del costo dinamico (componenti della scaffalatura, buffer, sistemi antincendio, aria condizionata, carrelli, trasloelevatori) e dei costi operativi (costi di manutenzione e il costo del personale).

Un diverso approccio progettuale si basa sulla cosiddetta *regola di Zollinger* (Tompkins et al., 1996), che specifica i parametri base di progettazione di un AS/RS e ne calcola successivamente l'utilizzo atteso sulla base della curva di domanda di stoccaggi e prelievi e del tempo medio di ciclo del trasloelevatore. Vengono valutate configurazioni diverse di AS/RS cambiando il numero, la profondità e l'altezza dei corridoi, intesi come multipli dei posti-pallet, generando un numero finito di alternative in grado di soddisfare l'indice di utilizzo desiderato; ogni potenziale configurazione ha, infatti, un impatto diverso sui tempi medi di ciclo, quindi una diversa capacità di soddisfare un dato livello di utilizzo del sistema. Il costo d'investimento di ciascuna alternativa viene calcolato adottando funzioni semplificate delle dimensioni del sistema; il focus è pertanto orientato principalmente sullo sviluppo di modelli di tempo che tengano conto delle differenti politiche di controllo degli AS/RS, come l'adozione di cicli singoli o doppi (Bozer and White, 1990) e le differenti politiche di allocazione (Malmborg, 2001; Eldemir et al., 2004; de Koster et al., 2008; Yu and de Koster, 2009).

La maggior parte della letteratura si basa su una descrizione semplificata

dei componenti degli AS/RS, come ad esempio la struttura della scaffalatura e il relativo costo, mentre altre caratteristiche importanti, quali il consumo energetico dovuto alle operazioni automatizzate di movimentazione, vengono trascurate. A tal riguardo, l'unico studio presente in letteratura che introduce la minimizzazione del consumo energetico nella progettazione di magazzino è quello di Compagno et al. (2013), che considera un sistema meccanizzato servito da carrelli elevatori a forche, rappresentato nello spazio a tre dimensioni come un volume continuo.

Come sostenuto da Gu et al. (2010) nella loro review sulla progettazione dei magazzini, vi è un enorme divario tra i modelli teorici per la progettazione dei magazzini e la pratica professionale; la collaborazione tra i professionisti e i ricercatori sembra essere molto limitata, mentre una più proficua interazione potrebbe portare ad un netto miglioramento dello stato dell'arte.

Sulla base di queste considerazioni, nel seguito verrà proposta una nuova metodologia di progettazione, che tiene particolarmente in considerazione i suggerimenti dei progettisti e dei fornitori di componentistica, al fine di rendere i modelli più realistici ed effettivamente adottabili.

6.3 Un nuovo approccio all'ottimizzazione della progettazione

La progettazione fisica di un AS/RS prevede in primo luogo la scelta del tipo di sistema da adottare e successivamente la configurazione del sistema stesso (si veda par. 1.2.3). In questo studio si è considerato un single unit-load aisle-captive AS/RS (par. 1.2.2), ovvero un AS/RS con un trasloelevatore per ogni corridoio (il trasloelevatore non può cambiare corsia), il quale immagazzina/preleva una unità di carico alla volta dalla scaffalatura, supposta fissa e a singola profondità, cosicché ogni unità di carico sia direttamente accessibile. Si suppone inoltre che la stazione di I/O sia situata nell'angolo inferiore sinistro della scaffalatura.

Una volta effettuata la scelta della tipologia di AS/RS su cui concentrarsi, si è proceduto all'ottimizzazione della configurazione del sistema.

Si è supposto che il numero di corridoi e la capacità della scaffalatura bifronte ciascun corridoio di servizio siano stati definiti nella fase iniziale di progettazione, sulla base della capacità di stoccaggio complessiva e della produttività richiesta dal supply chain manager, applicando ad esempio la regola di Zollinger. Fissata la capacità di stoccaggio per ogni corridoio, si può immaginare l'intero sistema AS/RS come la replica di un modulo base, costituito da due fronti della scaffalatura, il relativo corridoio di servizio e un trasloelevatore; ci si può così concentrare sull'ottimizzazione della scaffalatura di un singolo modulo, adottando un approccio progettuale più dettagliato e realistico, basato sulle opzioni reali di mercato per ogni componente, in

modo tale da ridurre il gap riscontrato da (Gu et al., 2010) tra la ricerca e la pratica nella progettazione del magazzino.

Viene proposto un approccio progettuale a due stadi, al fine di ridurre la complessità e allo stesso tempo aumentare il realismo e applicabilità dei modelli, schematizzato nel diagramma a blocchi di fig. 6.1.

Nella prima fase di progettazione, vengono generate le alternative progettuali di massima, in termini di numero di livelli e di colonne della scaffalatura e le velocità nominali dei trasloelevatori. Nella seconda fase, viene eseguita una caratterizzazione dettagliata di ciascuna opzione in termini di dimensionamento dei componenti e fabbisogni generati dalle movimentazioni, come descritto nei paragrafi seguenti.

L'approccio più dettagliato e realistico della seconda fase di progettazione permette di introdurre nei modelli di progettazione il concetto di sostenibilità nella sua declinazione di *triple bottom line* (si veda par. 1.1), cosicché possa essere valutato l'impatto di ogni potenziale configurazione di scaffalatura sia sui costi sia sull'impronta carbonica del sistema. Si sono creati due modelli separati per identificare la configurazione ottimale della scaffalatura di ciascun modulo, basati su due diverse prospettive: quella economica e quella ambientale. Questa separazione permette di identificare il potenziale trade-off, oltre che le eventuali convergenze, tra i diversi aspetti della sostenibilità, in modo da identificare possibili compromessi o *best practices* che consentano di promuovere una logistica sostenibile. I due modelli sono stati concepiti per essere utilizzati congiuntamente come un unico strumento di supporto decisionale, in grado di prendere in considerazione i diversi punti di vista dei vari stakeholder e forzare i progettisti a pensare in termini di sostenibilità delle soluzioni.

Al fine di migliorare la metodologia di progettazione, riducendo la distanza tra i modelli teorici e la prassi progettuale, si è collaborato in modo intensivo con i fornitori di AS/RS; i modelli risultanti da tale interazione sono approfonditi nel dettaglio nei paragrafi seguenti.

6.3.1 Principali problematiche e variabili decisionali della seconda fase di progettazione

Il primo passo per creare un modello di ottimizzazione progettuale è quello di identificare quali decisioni influenzino i costi di investimento e l'impronta carbonica di un modulo e quindi dell'intero magazzino.

Per una data capacità della scaffalatura, lo sviluppo verticale impatta direttamente sulla lunghezza dei corridoi e sull'occupazione a pavimento, incidendo sui costi di investimento del terreno; variano con l'altezza anche i costi delle fondamenta e l'impronta carbonica, dato che l'altezza del concrete slab è funzione dell'altezza del sistema, mentre la base dipende, per una data dimensione dei posti-pallet, dalla lunghezza dei corridoi. L'altezza della scaffalatura influenza anche le specifiche dei trasloelevatori e i loro costi,

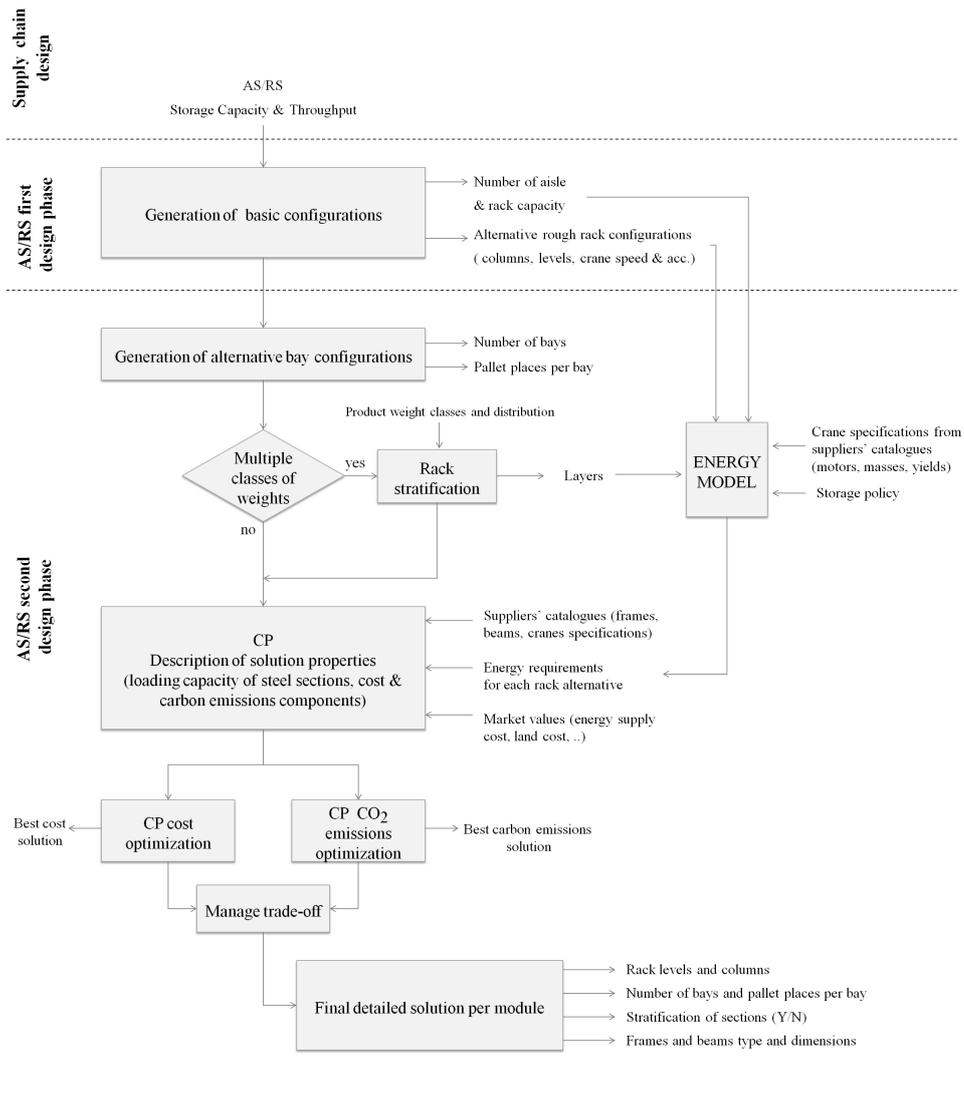


Figura 6.1. Approccio globale alla progettazione; si adotta il Constraint Programming (CP) nella seconda fase di progettazione

poiché è comune tra i fornitori classificare i propri prodotti in base alle altezze che possono essere servite: più alta è la scaffalatura più elevato è il costo del trasloelevatore, a causa della diversa struttura necessaria per garantire le traslazioni verticali.

Il numero di baie e i posti-pallet per baia determinano il numero e la lunghezza dei correnti e delle spalle; la configurazione delle baie influisce inoltre sulla capacità di carico delle coppie di montanti e correnti necessari per supportare il diverso numero di unità di carico, determinandone la sezione e influenzando così la quantità di acciaio utilizzata, con le relative ripercussioni sui costi e sull'impronta carbonica. Mentre in letteratura la configurazione delle baie è stata trascurata (si veda par. 6.2) valutando il costo delle scaffalature semplicemente in funzione dell'altezza o del numero totale di posti pallet, grande attenzione viene invece prestata loro dai progettisti, poiché la loro articolazione ha diretto impatto sulle sezioni dei profilati di acciaio da impiegare e conseguentemente sui relativi costi.

Si possono facilmente generare differenti configurazioni alternative di baie (il primo passo della seconda fase di progettazione nello schema a blocchi di fig. 6.1) per ciascuna opzione di scaffalatura della prima fase di progettazione, basandosi sul numero di posti pallet ammessi per baia (solitamente da 1 a 4).

Lo sviluppo orizzontale e verticale della scaffalatura influenza anche l'energia richiesta al trasloelevatore per stoccare e prelevare le unità di carico. Nei magazzini automatizzati, dove le operazioni non sono eseguite da personale ma da macchinari, il consumo di energia non può più essere trascurato, dal momento che colpisce sia i costi operativi, sia le emissioni di gas serra (GHG) legate all'approvvigionamento di energia elettrica; risulta dunque necessario utilizzare un modello per stimare il consumo di energia richiesto per servire una data configurazione di scaffalatura (si veda il relativo blocco nella parte destra della fig. 6.1), come quello proposto nel cap. 2.

Come visto nel cap. 3, il consumo energetico per la movimentazione del trasloelevatore viene influenzato dai criteri di storage assignment, che devono essere pertanto presi in considerazione per stimare correttamente il fabbisogno energetico del sistema. La politica di stoccaggio adottata principalmente nella progettazione dei magazzini è la politica casuale, in cui un prodotto è libero di occupare qualsiasi posizione disponibile e di conseguenza le sezioni della scaffalatura sono dimensionate per supportare le condizioni di massimo carico. Zerpour et al. (2013) hanno recentemente dimostrato che, nell'ipotesi di adottare cicli single command, le politiche di stoccaggio comunemente utilizzate in letteratura portano ad identificare la medesima configurazione ottimale del sistema, confermando così la correttezza della prassi di adottare la politica random, che presenta il grande vantaggio di ottimizzare l'AS/RS con informazioni minime sull'andamento della domanda dei prodotti.

Discutendo con i fornitori locali sul ruolo del peso dell'unità di carico nella progettazione dei magazzini, è emerso che, se le u.d.c. più pesanti ve-

nissero depositate nella zone inferiori della scaffalatura, risulterebbe possibile diminuire le sezioni trasversali degli elementi della scaffalatura spostandosi dal pavimento al soffitto, riducendo così i costi di investimento e, grazie all'utilizzo inferiore di acciaio, anche le emissioni di anidride carbonica. Non sarebbero inoltre da trascurare i benefici relativi ad una maggiore resistenza ai fenomeni sismici che tali soluzioni offrirebbero.

Nonostante la stratificazione della scaffalatura imponga alcuni vincoli ai clienti nella fase di allocazione dei prodotti, questa opportunità appare molto interessante in un'ottica sostenibile e merita di essere investigata. Per questo motivo si sono introdotte diverse classi di peso delle unità di carico e si è stratificata la scaffalatura come opzione nella seconda fase della progettazione (si veda fig. 6.1).

Come già discusso nel par. 3.5.1, la stratificazione consiste nel suddividere la scaffalatura in tante fasce orizzontali quante le classi di peso dei prodotti, vincolando gli elementi più pesanti ad occupare gli strati più bassi e dedicando via via in ordine decrescente dal basso verso l'alto i livelli più alti agli elementi leggeri.

Si suppone che ogni prodotto possa occupare una qualsiasi posizione libera all'interno della fascia associata alla propria classe di peso; quando necessario, una u.d.c. può occupare una locazione nella zona dedicata ad una classe più pesante, ma non viceversa. Questa politica verrà chiamata nel seguito *stratified random storage policy*. Per garantire una certa flessibilità nel gestire le variazioni di domanda e del mix di prodotti e migliorare la sicurezza del sistema, il numero di ripiani dedicato ai prodotti di peso maggiore viene sovrastimato rispetto a quelli più leggeri (si veda l'esempio in tab 6.1 relativo al caso di riferimento proposto in seguito).

Sulla base delle considerazioni precedenti, le seguenti domande dovrebbero essere affrontate dai modelli di ottimizzazione della progettazione:

- Qual è la migliore configurazione della scaffalatura, per una data capacità di stoccaggio stabilita dal supply chain manager, fra quelle identificate dalla prima fase di progettazione in termini di soli livelli e colonne?
- Quale dovrebbe essere l'effettiva articolazione delle baie?
- E' opportuno adottare una stratificazione della scaffalatura con relativa politica di stoccaggio?

Le principali variabili decisionali del modello, dichiarate come booleane, che ne derivano sono:

- **rack_r**: pari a 1 se la configurazione r dalla precedente fase di progettazione viene selezionata, 0 altrimenti.

- \mathbf{pp}_m : posta a 1 se vengono considerati m posti pallet per baia, 0 altrimenti.
- $\mathbf{storage}_k$: uguale a 1 se viene adottata la politica di allocazione k tra le opzioni considerate, 0 altrimenti.

Per la modellizzazione e risoluzione del problema si è adottata la metodologia del Constraint Programming, già introdotta nel par 5.4.1.

Per quanto concerne, invece, la stima dei fabbisogni energetici, per l'allocazione random il consumo energetico può essere stimato attraverso il rack energy potential (REP), come descritto nel par. 3.5.2 in presenza di carichi di diverso peso. In caso di stratificazione della scaffalatura, il consumo di energia viene calcolato stimando un REP diverso per ogni strato, tenendo conto del peso delle unità di carico che vengono assegnate ad esso; il fabbisogno energetico viene calcolato come la somma dell'energia necessaria per servire ogni classe, che può essere considerata come una sotto-scaffalatura con politica di allocazione casuale. La distribuzione della domanda tra le classi è necessaria per stimare il numero di cicli del trasloelevatore per ogni strato e quindi per poter calcolare il fabbisogno energetico della scaffalatura.

6.3.2 La funzione obiettivo nella prospettiva economica

La funzione obiettivo del modello, nella prospettiva economica, è volta alla minimizzazione del costo totale annuo del modulo di AS/RS. I costi annuali sono somma di due componenti:

- il costo di investimento, che è costituito da:
 - costo della scaffalatura;
 - costo del trasloelevatore;
 - costo delle fondamenta;
 - costo del terreno;
- costi operativi, pari alla somma del costo energetico e del costo di manutenzione. Quest'ultimo viene incluso nei costi di investimento di ogni componente, come è comune praticata.

La funzione obiettivo risultante viene espressa nell'eq. 6.1; le variabili decisionali e le variabili ausiliarie sono in grassetto (si veda in appendice al capitolo per un elenco completo delle variabili e dei parametri).

$$\min \quad (\mathbf{ann}_{\text{rack}} \cdot \mathbf{cost}_{\text{rack}} + \mathbf{ann}_{\text{crane}} \cdot \mathbf{cost}_{\text{crane}} + \mathbf{ann}_{\text{build}} \cdot \mathbf{cost}_{\text{build}} + \mathbf{ann}_{\text{land}} \cdot \mathbf{cost}_{\text{land}}) + \mathbf{ycost}_{\text{energy}} \quad (6.1)$$

Tutti i costi di investimento sono ricondotti all'anno tipo attraverso il rispettivo annuity factor (eq. 6.2), il quale considera la vita attesa s_x e il tasso di interesse i_x di ogni componente x del sistema e ne consente dunque una differenziazione.

$$\text{ann}_x = \frac{(1 + i_x)^{s_x} \cdot i_x}{(i_x + 1)^{s_x} - 1} \quad (6.2)$$

Il costo della scaffalatura per modulo può essere calcolato come somma del costo delle spalle, dei correnti e della soletta necessaria per chiudere la parte superiore della scaffalatura per ciascun lato del corridoio (eq. 6.3). Viene aggiunto un fattore correttivo α come percentuale del costo totale della scaffalatura, al fine di considerare gli ulteriori costi delle guide, dei supporti e dell'installazione, com'è comune nella pratica professionale.

$$\mathbf{cost}_{\text{rack}} = (1 + \alpha) \cdot 2(\mathbf{cost}_{\text{beams}} + \mathbf{cost}_{\text{frames}} + \mathbf{cost}_{\text{bracing}}) \quad (6.3)$$

Basandosi sulla prassi, il costo delle spalle ($\mathbf{cost}_{\text{frames}}$) viene calcolato in base al costo per unità di lunghezza ($\mathbf{frame_cost}_{i,j}$) riportato nei cataloghi dei produttori e connesso alle varie tipologie di spalla disponibili, che a sua volta dovrebbero essere scelte in base alla capacità di carico necessaria (si veda par. 6.3.4). Questa dipende essenzialmente dal numero i di posti pallet per ogni tipologia di baia; il numero di baie per tipologia lungo un fronte della scaffalatura è indicato con \mathbf{bays}_i (si veda eq. 6.4). Se viene introdotta la stratificazione, deve essere selezionato un diverso tipo di montante per ogni strato j costituito da \mathbf{levels}_j livelli di u.d.c., dato che deve essere sopportato un diverso carico. I ripiani vengono numerati dal soffitto al pavimento, in modo tale che le unità di carico pesanti vengano assegnate al ripiano \hat{j} . Si deve considerare un'ulteriore spalla rispetto al numero di baie per chiudere la struttura della scaffalatura, identificata con l'indice \hat{i} e dimensionata in base al massimo numero di posti pallet previsto tra le varie tipologie di baia selezionate. La lunghezza dei montanti viene definita considerando anche la necessità di assicurare che il primo livello di stoccaggio sia ad una corretta altezza da terra ($\text{height}_{\text{floor}}$ nell'eq. 6.4), affinché le locazioni possano essere servite correttamente dal trasloelevatore.

$$\begin{aligned} \mathbf{cost}_{\text{frames}} = & \sum_{i,j} \mathbf{frame_cost}_{i,j} \cdot (\text{height}_{\text{cell}} + \mathbf{beam_height}_{i,j}) \cdot \mathbf{levels}_j \cdot \mathbf{bays}_i + \\ & \sum_j \mathbf{frame_cost}_{\hat{i},j} \cdot (\text{height}_{\text{cell}} + \mathbf{beam_height}_{\hat{i},j}) \cdot \mathbf{levels}_j + \\ & \sum_i \mathbf{frame_cost}_{i,\hat{j}} \cdot \mathbf{bays}_i \cdot \text{height}_{\text{floor}} + \mathbf{frame_cost}_{\hat{i},\hat{j}} \cdot \text{height}_{\text{floor}} \quad (6.4) \end{aligned}$$

Il costo dei correnti ($\mathbf{cost}_{\mathbf{beams}}$, si veda eq. 6.5) viene valutato come il prodotto del costo specifico di mercato dell'acciaio $\mathbf{cost}_{\mathbf{steel}}$, del peso $\mathbf{beam_weight}_{i,j}$ di ciascuna coppia di correnti e del numero totale necessario. Il tipo di corrente è correlato al tipo di montante su cui viene installato, al numero di posti pallet per baia i e alla classe di peso j che deve sopportare, come definito dal relativo vincolo nel successivo paragrafo (si veda eq. 6.25). Si necessita di un'ulteriore fila di correnti per chiudere la parte superiore della scaffalatura, con un peso stimato pari ad una percentuale $\mathbf{beam_close}$ del corrente più leggero \check{j} , come suggerito dai costruttori.

Il costo della soletta di chiusura della scaffalatura ($\mathbf{cost}_{\mathbf{bracing}}$), costituita da una lastra di acciaio, viene calcolato in base alla superficie che deve essere coperta e il costo di mercato per metro quadro $\mathbf{cost}_{\mathbf{plate}}$, come riportato nell'eq. 6.6.

$$\mathbf{cost}_{\mathbf{beams}} = \mathbf{cost}_{\mathbf{steel}} \left(\sum_{i,j} \mathbf{beam_weight}_{i,j} \cdot \mathbf{levels}_j \cdot \mathbf{bays}_i + \mathbf{beam_close} \sum_i \mathbf{beam_weight}_{i,\check{j}} \cdot \mathbf{bays}_i \right) \quad (6.5)$$

$$\mathbf{cost}_{\mathbf{bracing}} = \mathbf{cost}_{\mathbf{plate}} \cdot 2 \cdot \mathbf{depth}_{\mathbf{cell}} \cdot \left(\mathbf{frame_width}_{i,\hat{j}} + \sum_i (i \cdot \mathbf{width}_{\mathbf{cell}} + \mathbf{frame_width}_{i,\check{j}}) \mathbf{bays}_i \right) \quad (6.6)$$

Il costo della fondamenta ($\mathbf{cost}_{\mathbf{build}}$ (eq. 6.8), si veda eq. 6.7), viene approssimato considerando un *concrete slab* con un costo per unità di volume pari a $\mathbf{cost}_{\mathbf{concrete}}$, posto sotto la superficie coperta da un modulo di magazzino, nell'ipotesi che il terreno presenti caratteristiche standard (come nelle precedenti equazioni, \hat{i} è il numero massimo di posti pallet per baia e \hat{j} è il ripiano con unità di carico più pesanti). Come nei precedenti modelli (ad esempio Karasawa et al. (1980)), l'altezza dello slab di cemento armato dipende dall'altezza del sistema e viene calcolata nell'eq. 6.9; la funzione in eq. 6.10 è stata individuata sulla base dei suggerimenti di progettisti strutturali (si vedano i parametri in appendice).

$$\mathbf{cost}_{\mathbf{build}} = \mathbf{cost}_{\mathbf{concrete}} \cdot \mathbf{area}_{\mathbf{slab}} \cdot \mathbf{height}_{\mathbf{slab}} \quad (6.7)$$

$$\mathbf{area}_{\mathbf{slab}} = (\mathbf{width}_{\mathbf{aisle}} + 2 \cdot \mathbf{depth}_{\mathbf{cell}}) \left(\mathbf{frame_width}_{i,\hat{j}} + \sum_i (i \cdot \mathbf{width}_{\mathbf{cell}} + \mathbf{frame_width}_{i,\check{j}}) \cdot \mathbf{bays}_i \right) \quad (6.8)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{height}_{\mathbf{rack}} &= \mathbf{height}_{\mathbf{floor}} + \sum_j (\mathbf{beam_height}_{\hat{i},j} + \mathbf{height}_{\mathbf{cell}}) \cdot \mathbf{levels}_j + \\ &\quad \mathbf{beam_height}_{\hat{i},\check{j}} + \mathbf{height}_{\mathbf{bracing}} \end{aligned} \quad (6.9)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{height}_{\mathbf{slab}} &= \mathbf{hmin}_{\mathbf{slab}} \quad \text{if } \mathbf{height}_{\mathbf{rack}} \leq \mathbf{h}_{\mathbf{build}} \\ &= \mathbf{hmin}_{\mathbf{slab}} + (\mathbf{height}_{\mathbf{rack}} - \mathbf{h}_{\mathbf{build}}) \cdot \mathbf{dh}_{\mathbf{slab}} \quad \text{otherwise} \end{aligned} \quad (6.10)$$

Il costo di investimento per l'acquisizione del terreno può essere calcolato in base alla superficie del modulo, come indicato nell'eq. 6.11.

$$\mathbf{cost}_{\mathbf{land}} = \mathbf{c}_{\mathbf{land}} \cdot \mathbf{area}_{\mathbf{slab}} \quad (6.11)$$

I costi di investimento del trasloelevatore sono strettamente connessi alla configurazione di scaffalatura che devono servire, con specifiche tecniche e i costi variabili principalmente in base all'altezza da raggiungere. Attraverso la consultazione dei cataloghi dei fornitori locali, nei quali i trasloelevatori sono classificati a seconda dei range di altezza che possono raggiungere, si è identificato il tipo corretto di trasloelevatore per ogni configurazione della scaffalatura, valutata come soluzione fattibile nella prima fase di progettazione.

I costi operativi sono essenzialmente legati all'energia necessaria al trasloelevatore per eseguire i cicli di prelievo e stoccaggio ($\mathbf{ycost}_{\mathbf{energy}}$, si veda eq. 6.12), che dipende sia dalla configurazione della scaffalatura r sia dalle politiche di allocazione k , come descritto nel successivo par. 6.3.4. L'energia richiesta da ogni combinazione di scaffalatura e politica di allocazione viene calcolata dal modello, secondo le specifiche del trasloelevatore utilizzato, come descritto nel par. 2.3. Tale energia verrà poi moltiplicata per il costo medio dell'energia elettrica ad uso industriale $\mathbf{cost}_{\mathbf{energy}}$.

$$\mathbf{ycost}_{\mathbf{energy}} = \mathbf{cost}_{\mathbf{energy}} \cdot \mathbf{energy} \quad (6.12)$$

6.3.3 La funzione obiettivo nella prospettiva ambientale

Al fine di valutare qual è la configurazione migliore dal punto di vista ambientale tra le soluzioni di massima identificate nella prima fase di progettazione, viene minimizzata l'impronta carbonica del modulo di magazzino.

Per valutare le emissioni equivalenti di anidride carbonica dell'AS/RS si è fatto riferimento ad un orizzonte temporale di \mathbf{timeH} anni, corrispondenti al minimo tempo di vita atteso per la scaffalatura. Si sono considerati solo gli apporti che si differenziano per le varie configurazioni di scaffalatura,

come le emissioni legate alla produzione di acciaio per i montanti, i correnti e la soletta di chiusura, le emissioni relative alla produzione di calcestruzzo per le fondamenta e le emissioni relative alla generazione di energia elettrica, per l'intero orizzonte temporale. Per quanto riguarda il trasloelevatore, non è stato possibile calcolare le emissioni legate alla sua costruzione, ma è tuttavia ragionevole supporre che non varino in modo significativo tra le varie configurazioni e quindi si possano ritenere trascurabili.

La funzione obiettivo del modello di ottimizzazione nell'ottica ambientale viene espressa dall'eq. 6.13.

$$\begin{aligned} \min \quad & ef_{\text{sections}} \cdot \mathbf{rack_weight} + ef_{\text{plate}} \cdot \mathbf{bracing_weight} + \\ & ef_{\text{concrete}} \cdot \mathbf{area}_{\text{slab}} \cdot \mathbf{height}_{\text{slab}} + ef_{\text{ensupply}} \cdot \mathbf{energy} \cdot \text{timeH} \end{aligned} \quad (6.13)$$

Il peso della scaffalatura **rack_weight** include le spalle e i correnti ed è calcolato con l'eq. 6.14, dove **frame_weight**_{*i,j*} è il peso per unità di lunghezza del tipo di spalla selezionato. Il peso della soletta superiore di chiusura **bracing_weight** viene calcolato con l'eq. 6.15 dove **weight**_{plate} è il peso per metro quadrato dell'acciaio (si veda la tabella dei parametri in appendice per il relativo valore). Come per il modello di costo, \hat{i} identifica il massimo numero di posti pallet per baia, mentre \hat{j} i livelli con unità di carico più pesanti.

$$\begin{aligned} \mathbf{rack_weight} = & 2 \left(\sum_{i,j} \mathbf{frame_weight}_{i,j} \cdot \mathbf{levels}_j \cdot \mathbf{bays}_i \cdot \right. \\ & (\mathbf{beam_height}_{i,j} + \mathbf{height}_{\text{cell}}) + \\ & \sum_j \mathbf{frame_weight}_{\hat{i},j} \cdot \mathbf{levels}_j \cdot (\mathbf{beam_height}_{\hat{i},j} + \mathbf{height}_{\text{cell}}) + \\ & \mathbf{height}_{\text{floor}} (\mathbf{frame_weight}_{\hat{i},\hat{j}} + \sum_i \mathbf{frame_weight}_{i,\hat{j}} \cdot \mathbf{bays}_i) + \\ & \sum_{i,j} \mathbf{beam_weight}_{i,j} \cdot \mathbf{levels}_j \cdot \mathbf{bays}_i + \\ & \left. \mathbf{beam_close} \sum_i \mathbf{beam_weight}_{i,\hat{j}} \cdot \mathbf{bays}_i \right) \end{aligned} \quad (6.14)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{bracing_weight} = & \mathbf{weight}_{\text{plate}} \cdot 2 \cdot \mathbf{depth}_{\text{cell}} \cdot \left(\mathbf{frame_width}_{\hat{i},\hat{j}} + \right. \\ & \left. \sum_i (i \cdot \mathbf{width}_{\text{cell}} + \mathbf{frame_width}_{i,\hat{j}}) \mathbf{bays}_i \right) \end{aligned} \quad (6.15)$$

I valori dei fattori di emissione considerati per la produzione di acciaio sono forniti da World Steel Association (2011), che adotta per la stima il

system expansion method of life-cycle, l'approccio consigliato dalle serie ISO 14040 e 14044 degli standard ambientali; pertanto, crediti vengono imputati ai processi di produzione i cui sottoprodotti consentono di risparmiare energia e ridurre le emissioni (ad es. il recupero energetico da gas di processo) o i cui prodotti possono essere riutilizzati o riciclati, come nel caso dell'acciaio. In particolare, si assume un fattore di emissione ef_{sections} di 0,762 kgCO₂eq/kg per profilati in acciaio (montanti e correnti) e un fattore di emissione ef_{plate} di 0,919 kgCO₂eq/kg per la lastra d'acciaio della soletta di chiusura superiore.

Per le emissioni della concrete slab, si è considerato un valore di 402,0 kgCO₂eq/m³ come calcolato da Nielsen (2008).

Per le emissioni legate all'energia elettrica fornita al sistema si è considerato un valore di 0,3821 kgCO₂eq/kWh corrispondente al mix di fornitura energetica italiana (Caputo, 2012).

6.3.4 Vincoli del modello

I vincoli sulle variabili decisionali assicurano che solamente una configurazione di scaffalatura, tra le C fattibili individuate nella fase di progettazione precedente, venga scelta dal risolutore (eq. 6.16), cosiccome venga adottato un solo criterio di allocazione (eq. 6.17) tra le S strategie proposte. Una sola dimensione principale della baia viene scelta tra il minimo min_{pp} e il massimo numero max_{pp} di posti pallet possibili in base al peso dell'unità di carico (eq. 6.18).

$$\sum_{r \in [1 \dots C]} \mathbf{rack}_r = 1 \quad \mathbf{rack}_r \in \{0, 1\} \quad (6.16)$$

$$\sum_{k \in [1 \dots S]} \mathbf{storage}_k = 1 \quad \mathbf{storage}_k \in \{0, 1\} \quad (6.17)$$

$$\sum_{m \in [min_{pp} \dots max_{pp}]} \mathbf{pp}_m = 1 \quad \mathbf{pp}_m \in \{0, 1\} \quad (6.18)$$

Per ogni combinazione di scaffalatura (ovvero numero di colonne) e numero di posti pallet per baia, il relativo numero di baie raramente risulta essere un numero intero; per evitare l'aumento della capacità di stoccaggio rispetto al valore individuato nella prima fase di design, vengono attribuiti un diverso numero di posti pallet rispetto al valore base ad un limitato numero di baie, in modo da rispettare il numero totale di colonne. Ad esempio, se il numero di colonne è 45 e il numero di posti pallet selezionato è 2, si potranno ottenere 21 baie con 2 posti pallet per baia e 1 baia con 3 posti

pallet, oppure 22 baie con 2 posti pallet e 1 baia con 1 posto pallet. Viene quindi introdotta la variabile booleana ausiliaria \mathbf{bb}_n (uguale a 1 se viene selezionata la configurazione di baia n , 0 altrimenti) per identificare la corretta configurazione di baia; il vincolo in eq. 6.19 assicura che sia selezionata solo una configurazione di baia tra le B possibili.

$$\sum_{n \in [1 \dots B]} \mathbf{bb}_n = 1 \quad \mathbf{bb}_n \in \{0, 1\} \quad (6.19)$$

Il secondo gruppo di vincoli permette di dettagliare la struttura della scaffalatura in termini di ripiani, colonne, baie e livelli per ogni strato sulla base delle variabili decisionali.

Data una configurazione di scaffalatura r , identificata nella prima fase della progettazione, vengono selezionati il numero di colonne e di livelli (si veda eq. 6.20); il numero effettivo di baie \mathbf{bays}_i costituite da i posti pallet per una data scaffalatura r , posti pallet m e configurazione di baia n deve rispettare i valori generati (si veda eq. 6.21). Infine, quando viene selezionata la politica di stratificazione della scaffalatura in base alle W classi di peso dei prodotti, deve essere identificato il corretto numero di livelli per ogni strato (si veda eq. 6.22); in assenza, invece, di stratificazione, viene considerato un unico strato che coinvolge l'intera scaffalatura.

$$\mathbf{rack}_r \Rightarrow [\mathbf{col}, \mathbf{rows}] = \text{RackVal}[r] \quad (6.20)$$

$$\mathbf{rack}_r \wedge \mathbf{pp}_m \wedge \mathbf{bb}_n \Rightarrow \mathbf{bays}_i = \text{BayVal}[r, m, n] \forall i \in [\mathit{min}_{pp} \dots \mathit{max}_{pp}] \quad (6.21)$$

$$\mathbf{rack}_r \wedge \mathbf{storage}_k \Rightarrow \mathbf{levels}_j = \text{LayVal}[r, k] \quad \forall j \in [1 \dots W] \quad (6.22)$$

I vincoli sopra riportati possono essere facilmente codificati in COMET grazie al *table constraint*, che vincola tre variabili ad assumere valori concordi con una delle triple contenute nella tabella passata come parametro. In questo caso, tutte le specifiche provenienti dalle combinazioni delle varie opzioni generate sono state organizzate secondo queste tabelle, in modo tale che le variabili vi debbano aderire (si vedano ad es. la Tabella 6.2 per l'eq. 6.21 e la Tabella 6.1 per l'eq. 6.22 per il caso di riferimento).

Il terzo gruppo di vincoli permette di scegliere correttamente il tipo di spalla e di corrente in base al carico che devono sopportare. Se viene stratificata la scaffalatura, le sezioni degli elementi diminuiscono dal pavimento al soffitto e devono pertanto essere selezionate diverse tipologie $\mathbf{frame}_{i,j}$ e $\mathbf{beam}_{i,j}$ per ogni tipo di baia i e per ogni strato j corrispondente ad una

diversa classe di peso (si veda eq. 6.23). Tutte le specifiche dei montanti e dei correnti devono essere compatibili con i cataloghi dei fornitori, che sono stati organizzati nelle tabelle $\text{FrameVal}[\mathbf{frame}_{i,j}]$ e $\text{BeamVal}[\mathbf{beam}_{i,j}]$ passate come parametro al table constraint di COMET (si vedano la Tabella 6.3 e Tabella 6.4 per il caso di riferimento considerato). La capacità massima di carico sopportata dai tipi di spalle e correnti selezionati deve essere sufficiente a sostenere il carico previsto, come riportato nell'eq. 6.26 e nell'eq. 6.28. Inoltre, i montanti delle spalle si appoggiano su una superficie di base ($\text{frame}_{\text{base}}$) in grado di sostenere un carico massimo per metro quadro pari a $\text{frame}_{\text{Qslab}}$, che non può essere superato (si veda eq. 6.27).

$$\begin{aligned} \mathbf{bays}_i = 0 &\Rightarrow \mathbf{frame}_{i,j} = 0 \wedge \mathbf{beam}_{i,j} = 0 \\ \mathbf{layer}_j = 0 &\Rightarrow \mathbf{frame}_{i,j} = 0 \wedge \mathbf{beam}_{i,j} = 0 \\ \mathbf{bays}_i > 0 \wedge \mathbf{layer}_j > 0 &\Rightarrow \mathbf{frame}_{i,j} > 0 \wedge \mathbf{beam}_{i,j} > 0 \quad \forall(i, j) \end{aligned} \quad (6.23)$$

$$\mathbf{frame}_{i,j} > 0 \Rightarrow [\mathbf{frame_width}_{i,j}, \mathbf{frame_weight}_{i,j}, \mathbf{frame_cost}_{i,j}, \mathbf{Qmax_frame}_{i,j}] = \text{FrameVal}[\mathbf{frame}_{i,j}] \quad \forall(i, j) \quad (6.24)$$

$$\mathbf{beam}_{i,j} > 0 \Rightarrow [\mathbf{beam_weight}_{i,j}, \mathbf{Qmax_beam}_{i,j}] = \text{BeamVal}[\mathbf{beam}_{i,j}] \quad (6.25)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{Qmax_frame}_{i,j} &< \sum_{k \leq j} (i \cdot \text{weight}_k + \mathbf{beam_weight}_{i,k}) \mathbf{levels}_k \\ &\Rightarrow \mathbf{bb}_n = 0 \quad \forall(i, j) \end{aligned} \quad (6.26)$$

$$\begin{aligned} &\left(\mathbf{frame_weight}_{i,j} \cdot \text{height}_{\text{floor}} + \sum_j \mathbf{levels}_j (i \cdot \text{weight}_j + \mathbf{beam_weight}_{i,j} + \right. \\ &\quad \left. \mathbf{frame_weight}_{i,j} \cdot (\text{height}_{\text{cell}} + \mathbf{beam_height}_{i,j})) \right) / (2 \cdot \text{frame}_{\text{base}}) \\ &> \text{frame}_{\text{Qslab}} \quad \Rightarrow \mathbf{bb}_n = 0 \quad \forall(i, j) \end{aligned} \quad (6.27)$$

$$\mathbf{Qmax_beam}_{i,j} < i \cdot \text{weight}_j \quad \Rightarrow \mathbf{bb}_n = 0 \quad \forall(i, j) \quad (6.28)$$

Il consumo di energia per i movimenti del trasloelevatore è strettamente legato alla configurazione della scaffalatura in termini di livelli e colonne,

specifiche del trasloelevatore e politica di allocazione. Le specifiche del trasloelevatore vengono identificate durante la prima fase di progettazione; in particolare, viene definita la velocità ed accelerazione per ogni configurazione di base della scaffalatura. Tali specifiche, insieme agli ulteriori dettagli sui motori ottenibili dai cataloghi dei fornitori, vengono pre-processate dal modello di energia (par. 2.3), per ogni dimensione della scaffalatura e per la politica di allocazione selezionata. Il consumo energetico annuo è valutato tenendo conto del numero di ore di funzionamento al giorno dell'AS/RS e della produttività del sistema: i valori per il caso di riferimento sono riportati nel par. 6.4.1. Si ottengono così i consumi energetici annui da associare alle varie alternative progettuali, i quali vengono inseriti nelle tabelle $\text{EnergyVal}[r,k]$, passate come parametro al table constraint nell'eq. 6.29 (si veda Tabella 6.6 per i valori del caso di riferimento).

$$\mathbf{rack}_r \wedge \mathbf{storage}_k \Rightarrow \mathbf{energy} = \text{EnergyVal}[r,k] \quad (6.29)$$

6.4 Risultati

I risultati ottenibili dai modelli progettuali proposti sono descritti nei paragrafi seguenti: nel par. 6.4.1, in particolare, viene presentato il caso studio con i relativi parametri di input, nel par. 6.4.2 viene analizzata la configurazione ottima dal punto di vista economico e viene condotta un'analisi di sensibilità sui parametri di sistema, mentre nel par. 6.4.3 vengono discusse le soluzioni ottenute minimizzando l'impronta carbonica associata al sistema.

6.4.1 Il caso studio

Dalla prima fase progettuale è stata definita una capacità di stoccaggio per ogni fronte del corridoio pari a 990 unità di carico (standard Euro-pallet); sono state, inoltre, identificate tre differenti configurazioni di base della scaffalatura che rispettano la capacità di stoccaggio selezionata, ovvero una soluzione di 99 colonne e 10 livelli, una di 66 colonne e 15 livelli e l'opzione 45 colonne e 22 livelli.

Il sistema deve gestire prodotti con differenti classi di peso: prodotti leggeri (200 kg), prodotti medi (600 kg), e prodotti pesanti (1000 kg), uniformemente distribuiti all'interno delle classi ABC della domanda.

Accanto al tradizionale criterio di allocazione casuale, che garantisce al cliente la massima flessibilità nello stoccaggio, si è considerata anche la *stratified random policy* indotta dall'eventuale stratificazione della scaffalatura. Sono stati quindi creati tre diversi strati, uno per classe di peso, e vincolati i prodotti più pesanti ad occupare le locazioni negli strati inferiori; all'interno di ciascun strato viene adottata l'allocazione di tipo casuale. I dati relativi alla stratificazione (utilizzati nell'eq. 6.22) sono riportati in Tabella 6.1.

Tabella 6.1. Possibile configurazione degli strati a seconda delle diverse opzioni di scaffalatura e politica di allocazione.

Tipo di scaffalatura	Politica di stoccaggio	N.livelli		
		200 kg	600 kg	1000 kg
10 × 99	random	0	0	10
10 × 99	stratificata	2	4	4
15 × 66	random	0	0	15
15 × 66	stratificata	4	5	6
22 × 45	random	0	0	22
22 × 45	stratificata	6	8	8

Tabella 6.2. Possibili configurazioni di baie a seconda delle diverse opzioni di scaffalatura e numero di posti pallet per baia.

Conf. Baie	Tipo di scaf.	Posti pallet per baia	N.baie			
			1 pp	2 pp	3 pp	4 pp
1	10 × 99	1	99	0	0	0
2	10 × 99	2	1	49	0	0
3	10 × 99	2	0	48	1	0
4	10 × 99	3	0	0	33	0
5	10 × 99	4	0	0	1	24
6	15 × 66	1	66	0	0	0
7	15 × 66	2	0	33	0	0
8	15 × 66	3	0	0	22	0
9	15 × 66	4	0	1	0	16
10	22 × 45	1	45	0	0	0
11	22 × 45	2	0	21	1	0
12	22 × 45	2	1	22	0	0
13	22 × 45	3	0	0	15	0
14	22 × 45	4	0	1	1	10

Sulla base delle disponibilità deducibili dai cataloghi dei fornitori e del peso dei prodotti, il numero di posti pallet per baia è fatto variare dal valore minimo di 1 posto-pallet per baia ad un massimo di 4, generando in tal modo le possibili configurazioni di baia riportate nella tabella 6.2 e considerate nell'eq. 6.21).

Per le specifiche dei montanti e correnti, desunte dai cataloghi dei fornitori, si sono utilizzati i valori riportati nelle Tabelle 6.3 e 6.4.

I costi operativi vengono valutati dopo aver calcolato i valori dei REP per ogni combinazione di scaffalatura e criterio di allocazione, sulla base delle specifiche del trasloelevatore riportate in Tabella 6.5. Il consumo energetico finale viene ottenuto considerando un throughput pari a 50 u.d.c./ora, un rendimento elettrico dei motori dei trasloelevatori pari a 0,9, un utilizzo del sistema corrispondente a 300 giorni/anno, 24 ore/giorno. Il costo energetico

Tabella 6.3. Specifiche delle spalle: codice, massima capacità di carico, costo per unità di lunghezza, peso per unità di lunghezza, ingombro

Tipo spalla	Carico massimo [kg]	Costo [€/m]	Peso [kg/m]	Larghezza [mm]
A	14000	42,8	12,0	100
B	18000	49,6	14,0	120
C	18900	66,3	18,0	100
D	24300	73,6	21,0	120
E	27700	85,2	25,0	100
F	31500	85,6	24,5	120
G	36000	99,2	29,0	120
H	44000	74,4	25,0	160

Tabella 6.4. Specifiche dei correnti: codice, posti-pallet, tipo spalla, massima capacità di carico, peso per coppia di corrente, altezza.

Tipo corrente	Posti pallet	Tipo spalla	Carico massimo [kg]	Peso [kg/pair]	Altezza [mm]
1	1	A	1000	8,0	60
...
6	2	B	1215	15,4	60
...
11	3	B	600	22,6	60
...
14	3	B	1850	27,2	100
...
38	3	D	3100	31,4	130
...
101	3	H	3100	31,4	130
...
109	4	H	3595	51,4	270

è stato scelto in base al costo medio italiano di approvvigionamento per clienti industriali pari a 0,11 Euro/kWh (Italian Regulatory Authority for Electricity and Gas, 2011).

Tutti i valori dei parametri utilizzati come dati di input per i modelli sono riportati in Tabella 6.12 in appendice.

6.4.2 Soluzione ottima del modello economico

Per il caso di studio, il modello di costo suggerisce di adottare la scaffalatura 10×99 con l'utilizzo della stratificazione e 3 posti-pallet per baia. La configurazione ottimale della scaffalatura presenta dunque 10 ripiani verticali (4 livelli che sopportano u.d.c di 1000 kg, 4 livelli per u.d.c. da 600 kg e 2 livelli per u.d.c. da 200 kg) e 33 baie con 3 posti pallet ciascuna.

Tabella 6.5. Principali specifiche dei trasloelevatori.

	Configurazione della scaffalatura		
	10 × 99	16 × 55	22 × 45
Trasloelevatore			
Velocità orizzontale [m/s]	4,0	3,0	3,0
Accelerazione orizzontale [m/s^2]	0,8	0,4	0,4
Velocità verticale [m/s]	0,9	0,9	0,9
Accelerazione verticale [m/s^2]	0,8	0,6	0,6
Costi di investimento [€]	150000	200000	250000
motore asse x			
Velocità [rpm]	2600	2509	2509
Momento d'inerzia [kgm^2]	0,093	0,093	0,0093
Coppia massima [Nm]	240	240	240
motore asse y			
Velocità [rpm]	3825	2579	2579
Momento d'inerzia [kgm^2]	0,022	0,093	0,093
Coppia massima [Nm]	191	240	240

Tabella 6.6. Consumo di energia per tipo di scaffalatura e politica di allocazione

Tipo scaffalatura	Fabbisogno di energia [kWh/yr]	
	<i>Random</i>	<i>Stratificata</i>
10 × 99	69049	68865
15 × 66	67916	67160
22 × 45	67330	66031

Tabella 6.7. Costi relativi alla soluzione ottimale: scaffalatura 10×99 , stratified random storage policy e 3 posti-pallet per baia.

Costo delle spalle	[€/yr]	4950
Costo dei correnti	[€/yr]	2381
Costo soletta chiusura	[€/yr]	449
Altri costi (installazione, guide...)	[€/yr]	3890
Costo scaffalatura	[€/yr]	11670
Volume Slab	[m ³]	365
Costo delle fondamenta	[€/yr]	10247
Area del modulo	[m ²]	365
Costo del terreno	[€/yr]	2332
Costo del trasloelevatore	[€/yr]	19426
Consumo energetico	[kWh/yr]	68865
Costo dell'energia	[€/yr]	7575
Costo totale	[€/yr]	51250

Avendo selezionato come opportuna una stratificazione della scaffalatura, il modello identifica diversi tipi di montante per ogni strato: tipo B per gli strati da 200 kg e 600 kg e tipo D per lo strato da 1000 kg (si veda Tab. 6.3). Vengono selezionati analogamente differenti tipologie di correnti per ogni livello: il tipo 11 per sostenere le u.d.c. di 200 kg, il tipo 14 per i 600 kg e il tipo 38 per u.d.c. da 1000 kg (si veda la Tabella 6.4).

Il tempo di CPU necessario per calcolare la soluzione ottima è di 93 ms con un computer portatile Windows7 64 bit 2.4 GHz.

I dati relativi ai costi della scaffalatura per la configurazione ottimale sono riportati in Tabella 6.7. Focalizzando l'attenzione sulla struttura di costo, si deduce che i montanti impattano per il 43%, il costo dei correnti raggiunge il 20 %, mentre il costo della soletta di chiusura superiore risulta essere meno rilevante (4%). Questo è il motivo per cui viene preferito uno sviluppo orizzontale della scaffalatura, che consente di ridurre, infatti, significativamente il costo dei montanti, oltre a permettere l'utilizzo di un trasloelevatore più economico, il cui costo di investimento influisce per il 38 % sul costo totale annuo (si veda Fig. 6.2). Il minor sviluppo verticale incide anche sui costi delle fondamenta, essendo lo spessore del concrete slab funzione dell'altezza del magazzino; questi vantaggi superano la maggior occupazione in pianta e il maggior consumo energetico del sistema imputabile alle scaffalature a sviluppo orizzontale.

Dalla figura 6.3 è possibile notare la distribuzione dei costi delle soluzioni ottimali in termini di posti-pallet e configurazione delle baie per ogni possibile combinazione di scaffalatura (ottenuta dalla prima fase di progettazione) e politica di allocazione.

Qualora il cliente richieda grande flessibilità per poter affrontare eventuali modifiche della curva di domanda tra le varie classi di peso, è necessario

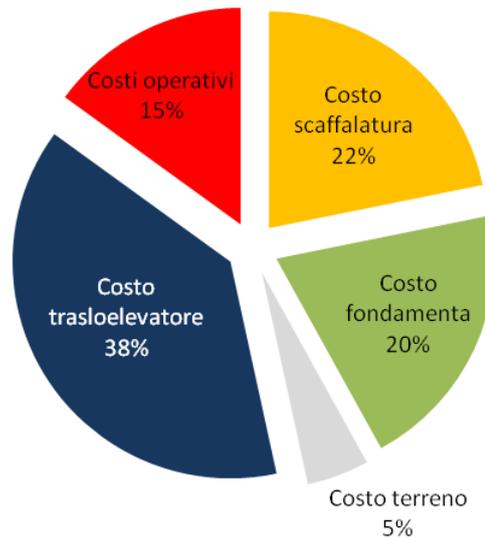


Figura 6.2. Distribuzione dei costi totali annui per la configurazione ottima.

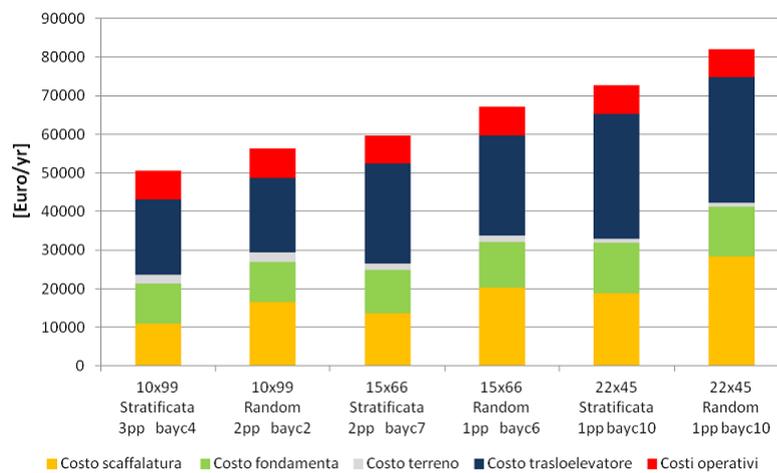


Figura 6.3. Distribuzione dei costi totali annui della miglior soluzione per ogni possibile combinazione di scaffalatura e politica di allocazione.

adottare il criterio di allocazione casuale. In questo caso, la migliore configurazione rimane comunque la scaffalatura 10×99 con tre posti pallet per baia e la configurazione di baia numero 4 (si veda Tabella 6.2), ma con un peggioramento del 19,9 % dei costi di investimento della scaffalatura rispetto alla soluzione stratificata. Questo è dovuto al fatto che tutte le sezioni devono essere dimensionate al fine di sostenere il carico massimo; la maggior capacità di carico necessaria ai montanti e correnti porta alla selezione da parte del solver di diverse tipologie rispetto a quelle adottate nella soluzione stratificata (spalla di tipo H in Tabella 6.3 e corrente 101 in Tabella 6.4).

Nel caso in cui si abbia una limitata estensione del terreno, potrebbe dover essere utilizzata una struttura maggiormente sviluppata in altezza. Questo comporta una diminuzione dei posti pallet per baia, con 1 posto-pallet come unica soluzione fattibile per la scaffalatura 22×45 con politica random a causa del vincolo in eq. 6.27. I costi totali di investimento per la stratified storage policy aumentano del 13% con la scaffalatura 15×66 e del 31% per la scaffalatura 22×45 rispetto alla soluzione ottima 10×99 . L'aumento dei costi è dovuto principalmente alla scaffalatura, alle fondamenta, e al trasloelevatore, ovvero alle componenti di costo direttamente collegate all'altezza del sistema.

I costi operativi risultano leggermente inferiori per la politica di allocazione stratificata rispetto a quelli ottenibili dalla politica random (fino al 2% per la scaffalatura 22×45), in quanto con la politica stratificata le unità di carico pesanti sono soggette a spostamenti verticali ridotti essendo vincolate all'interno dello strato inferiore, portando così ad un risparmio energetico, il cui ammontare dipende dalla distribuzione dei livelli tra gli strati e dal peso dei prodotti della relativa classe. Passando da una scaffalatura sviluppata orizzontale ad una più sviluppata verticalmente, il fabbisogno energetico diminuisce (circa -2,2% per la 22×45 rispetto alla 10×99), in quanto i movimenti verticali possono contare sul contributo della gravità che permette di considerare nulla l'energia nella fase di discesa del carico. Al contrario, gli spostamenti orizzontali richiedono sempre energia per bilanciare l'inerzia in fase di accelerazione e l'attrito, che può diventare significativa quando la scaffalatura ha un forte sviluppo orizzontale.

La soluzione ottima a sviluppo orizzontale rimane stabile al variare del costo di mercato per l'approvvigionamento di energia elettrica: un aumento del costo dell'energia del 50% comporterebbe un incremento del 7,4% del costo totale annuo.

Dal punto di vista del supply chain management, potrebbe essere interessante analizzare l'impatto del peso dell'unità del carico sulla configurazione della scaffalatura e sul costo complessivo del sistema, dal momento che si potrebbe, per esempio, distribuire diversamente i prodotti tra i magazzini. Si è preso in considerazione il caso di un AS/RS con prodotti mono-peso; i risultati per i tre possibili valori di peso adottati per il sistema con pesi multipli, sono riportati in Tabella 6.8. La miglior soluzione risulta essere ancora

Tabella 6.8. Risultati per sistemi con u.d.c. mono-peso.

Componenti	Peso dell'unità di carico [kg]		
	200	600	1000
Tipo di scaffalatura	10 × 99	10 × 99	10 × 99
Posti pallet per baia	3	2	2
Configurazione della baia	4	2	2
Costo della scaffalatura [€/yr]	9489	12509	17246
Costo del terreno [€/yr]	2333	2383	2383
Costo delle fondamenta [€/yr]	10206	10427	10427
Costo del trasloelevatore [€/yr]	19426	19426	19426
Costo approv. energia [€/yr]	7308	7595	7882
Costo totale [€/yr]	48763	52341	57364

la scaffalatura 10 × 99, ma il numero di posti pallet per baia diminuisce per unità di carico pesanti e l'occupazione a pavimento aumenta leggermente con impatto sui costi del terreno e delle fondamenta a causa del maggior numero di montanti. I costi della scaffalatura aumentano del 31,8% passando da carichi da 200 kg a carichi di 600 kg e di 81,7% quando si passa da 200 kg a 1000 kg. Anche le richieste energetiche crescono: il REP varia da 1,17 GJ per prodotti leggeri, a 1,22 GJ per pesi medi, a circa 1,27 GJ per i prodotti pesanti; l'aumento del relativo costo energetico risulta essere quindi del 3,9% quando si passa da u.d.c. di 200 kg a quelle di 600 kg e del 7,9% quando si passa 200 kg a 1000 kg. L'aumento relativo del costo totale nel passaggio da pesi leggeri a pesi medi è del 7,3%, mentre si raggiunge il 17,6% passando da carichi leggeri a carichi pesanti.

6.4.3 Soluzione ottima del modello ambientale

Il modello basato sulle emissioni di anidride carbonica riconosce come soluzione ottimale la stessa configurazione di scaffalatura del modello basato sui costi, ovvero la scaffalatura 10 × 99 con stratificazione della scaffalatura e tre posti pallet per baia; i relativi dati di emissione sono rappresentati nella tabella 6.9. Il tempo di CPU richiesto per identificare la soluzione ottima è di 109 ms su una macchina Windows7 64 bit 2,4 GHz .

Dal punto di vista ambientale la componente più significativa nel causare emissioni di CO₂ è la fornitura di energia elettrica, che rappresenta il 75% della impronta carbonica totale come riportato in Fig. 6.4. Circa il 21% è determinato dal concrete slab, mentre la struttura influisce per meno del 4 % sulle emissioni grazie all'elevata riciclabilità degli elementi in acciaio.

La stratificazione della scaffalatura porta all'utilizzo di una minor quantità di acciaio dato che la sezione degli elementi decresce dal pavimento al soffitto; consente, inoltre, di ridurre il consumo energetico per i movimenti del trasloelevatore. Se tuttavia fosse necessaria elevata flessibilità nell'affron-

Tabella 6.9. Dati delle emissioni per la soluzione ottima: scaffalatura 10×99 , stratified storage policy e 3 posti pallet per baia.

Peso montanti	[kg]	17517
Peso correnti	[kg]	19344
Emissioni struttura	[kgCO ₂ eq]	28088
Peso soletta di chiusura	[kg]	3511
Emissioni soletta di chiusura	[kgCO ₂ eq]	3227
Volume concrete slab	[m ³]	365
Emissioni concrete slab	[kgCO ₂ eq]	146672
Consumo energetico	[kWh/yr]	68865
Emissioni fornitura energetica	[kgCO ₂ eq]	534115
Emissioni totali	[kgCO ₂ eq]	712102

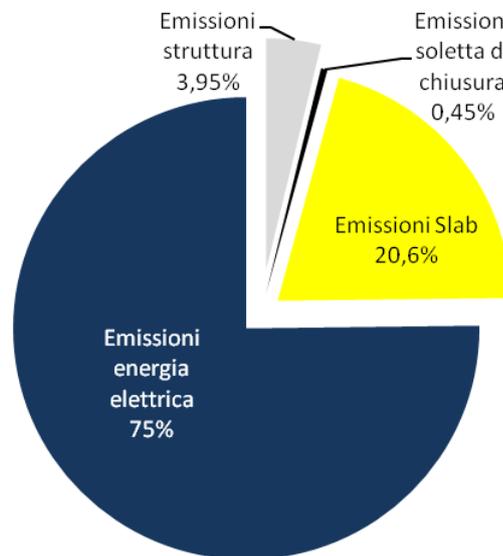


Figura 6.4. Distribuzione delle emissioni totali annue per la configurazione ottima.

tare i cambiamenti della domanda e si dovesse quindi optare per una politica di allocazione casuale, questo comporterebbe un incremento del 1,8 % delle emissioni totali (si veda Figura 6.5). La configurazione migliore risulterebbe sempre la scaffalatura sviluppata in orizzontale, ma il numero di posti-pallet per baia diminuirebbe rispetto alla soluzione basata sui costi, dato il maggior carico da sopportare; pur aumentando il peso della scaffalatura, si avrebbe, tuttavia, un leggero decremento del volume dello slab con una riduzione delle emissioni totali in virtù del maggior fattore di emissione rispetto all'acciaio.

Analizzando le strutture di scaffalatura sviluppate verticalmente, il numero di posti-pallet per baia diminuisce ulteriormente, principalmente a causa del vincolo relativo al carico sulla base dei montanti (si veda eq.6.27). Le emissioni di anidride carbonica della soletta di chiusura diminuiscono, in quanto la metratura da coprire con la lastra d'acciaio è minore quando si passi a sistemi molto alti; anche il consumo di energia si riduce leggermente passando da scaffalature orizzontali a verticali (-2,5% per la 15×66 con stratificazione -4,1% per la 22×45). L'andamento opposto delle emissioni della scaffalatura e delle fondamenta possono essere apprezzati in Figura 6.5; il volume della concrete slab aumenta rispetto alla soluzione orizzontale ottimale a causa dell'aumento di altezza del sistema, portando ad un aumento relativo delle emissioni del 12,1% e il 21% se si considerano le scaffalature stratificate 15×66 e 22×45 rispettivamente. Per quanto riguarda i componenti strutturali della scaffalatura, i risultati mostrano come le emissioni dei correnti diminuiscano con il passaggio a configurazioni più verticali, mentre i montanti registrano un comportamento opposto, ma con un maggiore coefficiente di variazione, con conseguente aumento del peso finale della scaffalatura e delle relative emissioni (12,5% per la scaffalatura 15×66 and 23,5% per la 22×45).

Considerando sistemi a peso singolo per l'analisi della supply chain, si ottengono i risultati riportati in Tabella 6.10.

Le soluzioni ottimali per prodotti leggeri e pesanti sono le stesse sia dal punto di vista ambientale che da quello economico (stessa scaffalatura e configurazione delle baie), mentre per prodotti di peso medio (600 kg), invece, la configurazione che minimizza l'impronta carbonica è la scaffalatura 10×99 con 3 posti pallet per baia. La soluzione economicamente ottimale per il sistema con prodotti di peso medio, tuttavia, registra un aumento delle emissioni dello 0,08% rispetto a quella ad impronta carbonica ottimale, mentre quest'ultima presenta un costo annuale maggiore dello 0,8%. Ciò significa che la soluzione ottimale dal punto di vista economico può anche essere considerato un buon compromesso dal punto di vista ambientale, permettendo così di soddisfare entrambi i requisiti.

L'aumento relativo delle emissioni passando da sistemi con unità di carico di 200 kg ad altri con prodotti di 600 kg e 1000 kg, è rispettivamente del 4,1% e del 8,6%, con una crescita inferiore a quella imputabile al costo annuo (7,3% e il 17,6%, come descritto nel paragrafo precedente). L'impatto maggiore

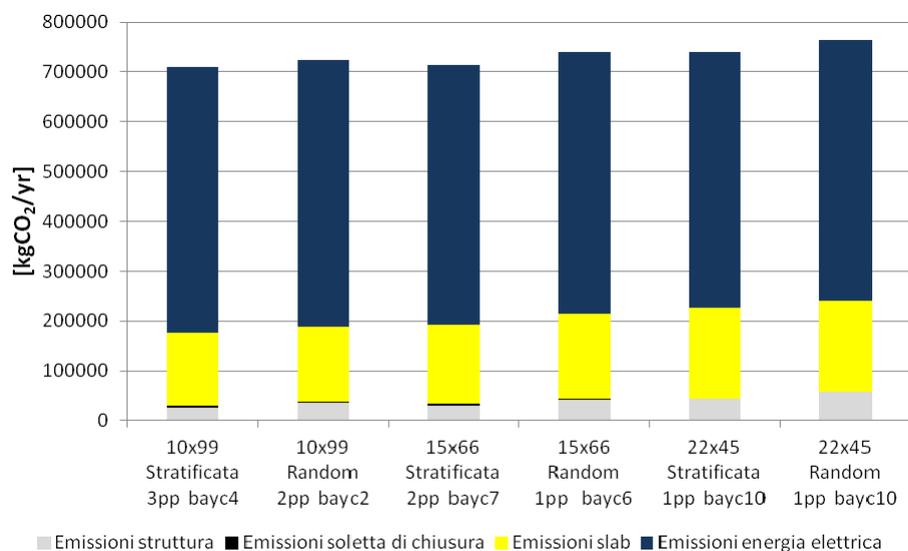


Figura 6.5. Distribuzione delle emissioni totali annue della miglior soluzione per ogni possibile combinazione di scaffalatura e politica di allocazione.

sulle emissioni è dovuto alla variazione degli elementi della scaffalatura, il cui incremento di emissioni è di circa 36,1% passando da un sistema con u.d.c. da 200 kg ad uno da 600 kg e del 66,5% passando da 200 kg ad un sistema con u.d.c. di 1000 kg, mentre i valori di approvvigionamento energetico variano del 3,9% e del 7,9% passando da 200 kg a 600 kg e da 200 kg a 1000 kg rispettivamente.

Tabella 6.10. Emissioni per sistemi mono-peso

Componenti	Peso unità di carico [kg]		
	200	600	1000
Tipo scaffalatura	10 × 99	10 × 99	10 × 99
Posti pallet per baia	3	3	2
Configurazione baia	4	4	2
Emissioni struttura [kgCO ₂ eq]	22638	30822	37693
Emissioni soletta di chiusura [kgCO ₂ eq]	3227	3227	3297
Emissioni concrete slab [kgCO ₂ eq]	146088	146088	149255
Emissioni fornitura energetica [kgCO ₂ eq]	515302	535543	555785
Total emissions [kgCO₂eq]	687254	715679	746030

6.5 Conclusioni

Nel presente capitolo è stata proposta l'adozione di un approccio progettuale in due fasi, in modo tale che, dopo una prima selezione delle alternative di base, possa essere svolta un'analisi più approfondita delle opzioni in termini di configurazione baia, dimensionamento dei componenti e fabbisogno energetico. Attraverso l'approccio metodologico del Constraint Programming la modellizzazione del problema è risultata facilitata, potendosi concentrare solo sulla descrizione delle proprietà della soluzione piuttosto che su algoritmi per la sua ricerca; anche la fase di solving si è dimostrata efficiente.

Questo approccio più dettagliato e realistico alla progettazione permette di ridurre il divario tra la pratica professionale, la disponibilità dei componenti sul mercato e i modelli teorici, accorciando le distanze tra il mondo della ricerca e l'applicazione reale, come è stato più volte suggerito dalle recenti review della letteratura sulla progettazione del magazzino automatizzato.

L'approccio proposto introduce anche il concetto di sostenibilità nei modelli di progettazione, in modo da poter valutare l'impatto di ogni possibile configurazione della scaffalatura sul costo e sull'impronta carbonica del magazzino. Sono stati creati due differenti modelli per l'ottimizzazione della configurazione di un modulo di AS/RS secondo la prospettiva economica e quella ambientale; questa separazione permette di identificare il potenziale trade-off tra i diversi aspetti della sostenibilità, cosiccome le eventuali convergenze, in modo che opportuni compromessi o *best practices* atti a favorire una logistica sostenibile possano essere identificati. Il potenziale insito nei due modelli sta nel loro utilizzo congiunto come un unico strumento di supporto alle decisioni, in grado di permettere ai vari stakeholders di confrontare i diversi punti di vista economico e ambientale.

Nel caso studio il risultato ottimale del modello di costo coincide essenzialmente con la configurazione atta a minimizzare l'impatto ambientale, rafforzando l'idea che sia effettivamente possibile, con opportuni strumenti di ottimizzazione, identificare soluzioni logistiche sostenibili, capaci di conquistare sia vantaggi ambientali sia economici.

In generale, lo strumento proposto può essere utile ad un'impresa per prendere decisioni adeguate a secondo delle proprie strategie; se il proprietario del nuovo magazzino automatizzato è particolarmente sensibile alla crescente coscienza sociale verso le problematiche ambientali e intende capitalizzare sulla fedeltà del cliente ad un marchio verde, può prendere in considerazione la miglior soluzione ambientale o qualche compromesso tra i risultati in uscita dai due modelli.

Altri stakeholders possono trarre vantaggio dall'utilizzo di questo strumento di supporto alle decisioni. Un ente pubblico, ad esempio, per promuovere iniziative sostenibili al fine di rispettare impegni comunitari quali l'Agenda 21 (United Nations (1992)), potrebbe decidere di sostenere le imprese locali nell'adozione di impianti a basse emissioni con sovvenzioni pubbliche

sugli investimenti o detrazioni fiscali. L'utilizzo dei due modelli proposti è in grado di aiutare le istituzioni pubbliche a dimensionare adeguatamente l'entità del contributo, in modo da abbattere la differenza di costo tra la soluzione al minimo costo e quella al minimo impatto ambientale, forzando così le imprese a realizzare strutture ecologiche.

Tabella 6.11. Variabili del modello

Simbolo	Descrizione
$area_{slab}$	Area a pavimento del modulo slab
$bays_i$	Numero di baie con i posti pallet
bb_n	Var. booleana: 1 se viene selezionata la configurazione di baia n , 0 altrimenti
$beam_{i,j}$	Codice di corrente per i posti pallet per baia e classe di carico j
$beam_height_{i,j}$	Altezza del corrente per i posti pallet per baia e classe di carico j
$beam_weight_{i,j}$	Peso del corrente per i posti pallet per baia e classe di carico j
$bracing_weight$	Peso sella soletta di chiusura
col	Numero di colonne per la scaffalatura selezionata
$cost_{beams}$	Costo correnti
$cost_{bracing}$	Costo soletta di chiusura
$cost_{build}$	Costi fondamenta
$cost_{crane}$	Costi trasloelevatore
$cost_{frames}$	Costi montanti
$cost_{land}$	Costo per il terreno
$cost_{rack}$	Costo della scaffalatura
$energy$	Fabbisogno energetico annuale per la configurazione selezionata [kWh/yr]
$frame_cost_{i,j}$	Costo montanti per unità di lunghezza
$frame_{i,j}$	Codice montante per i posti pallet per baia e classe di carico j
$frame_weight_{i,j}$	Peso per unità di lunghezza dei montanti per i posti pallet per baia e classe di carico j
$frame_width_{i,j}$	Larghezza dei montanti per i posti pallet per baia e classe di carico j
$height_{rack}$	Altezza della scaffalatura
$height_{slab}$	Altezza della concrete slab per le fondamenta
$layer_j$	Possibili strati in base alle classi di peso
$levels_j$	Numero di ripiani per strato j
pp_m	Var. booleana: 1 se vengono considerati m posti pallet per baia , 0 altrimenti
$Qmax_beam_{i,j}$	Massima capacità di carico dei correnti per i posti pallet per baia e classe di carico j
$Qmax_frame_{i,j}$	Massima capacità di carico dei montanti per i posti pallet per baia e classe di carico j
$rack_r$	Var. booleana: 1 se viene selezionata la scaffalatura r , 0 altrimenti
$rack_weight$	Totale peso della scaffalatura
$rows$	Numero di ripiani della scaffalatura selezionata
$storage_k$	Var. booleana: 1 se viene adottata la politica di allocazione k , 0 altrimenti
$ycost_{energy}$	Costi energetici annuali

Tabella 6.12. Parametri del modello: simboli e valori per il caso di riferimento

Simbolo	Descrizione	Valore
α	Fattore addizionale relativo ai costi di guide, supporti e installazione	0,5
$\text{ann}_{\text{build}}$	Annuity factor delle fondamenta ($i = 5\%$ and $s=20$ anni)	0,0802
$\text{ann}_{\text{crane}}$	Annuity factor del trasloelevatore ($i = 5\%$ and $s=10$ anni)	0,1295
ann_{land}	Annuity factor del terreno ($i = 5\%$ and $s=20$ anni)	0,0802
ann_{rack}	Annuity factor della scaffalatura ($i = 5\%$ and $s=20$ anni)	0,0802
$\text{beam}_{\text{close}}$	Fattore di peso dei correnti per la chiusura superiore della scaffalatura	0,6
$\text{cost}_{\text{concrete}}$	Costi unitari della concrete slab [$\text{€}/\text{m}^3$]	350,00
$\text{cost}_{\text{energy}}$	Costi unitari della fornitura energetica [$\text{€}/\text{kWh}$]	0,11
c_{land}	Costo del terreno [$\text{€}/\text{m}^2$]	80,00
$\text{cost}_{\text{plate}}$	Costo soletta di chiusura [$\text{€}/\text{m}^2$]	25,00
$\text{cost}_{\text{steel}}$	Costo unitario dell'acciaio [$\text{€}/\text{kg}$]	1,60
$\text{depth}_{\text{cell}}$	Profondità della cella unit load [m]	1,2
dh_{slab}	Coefficiente di altezza del concrete slab	0,1
$\text{ef}_{\text{concrete}}$	Fattore di emissione del concrete [$\text{kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^3$]	402,0
$\text{ef}_{\text{ensupply}}$	Fattore di emissione della fornitura energetica [$\text{kgCO}_2\text{eq}/\text{kWh}$]	0,3821
ef_{plate}	Fattore di emissione della lastra di acciaio [$\text{kgCO}_2\text{eq}/\text{kg}$]	0,9190
$\text{ef}_{\text{sections}}$	Fattore di emissione della sezione di acciaio [$\text{kgCO}_2\text{eq}/\text{kg}$]	0,7620
$\text{frame}_{\text{base}}$	Area della base del montante [cm^2]	900
$\text{frame}_{\text{Qslab}}$	Massima capacità di carico della base del montante [kg/cm^2]	33,3
h_{build}	Altezza del sistema corrispondente ad un 1 m di altezza del concrete slab [m]	15,0
$\text{height}_{\text{bracing}}$	Altezza della soletta di chiusura [m]	0,005
$\text{height}_{\text{cell}}$	Altezza della cella (altezza unità di carico + spazio per pick/drop) [m]	1,3
$\text{height}_{\text{floor}}$	Altezza del primo ripiano dal pavimento [m]	1,0
$\text{hmin}_{\text{slab}}$	Altezza minima del concrete slab [m]	1,0
throughput	Produttività richiesta [cycles/h]	50
timeH	Orizzonte temporale per l'impronta carbonica[yr]	20
weight_1	Peso dell'unità di caricodi classe 1 [kg]	200
weight_2	Peso dell'unità di caricodi classe 2 [kg]	600
weight_3	Peso dell'unità di caricodi classe 3 [kg]	1000
$\text{width}_{\text{aisle}}$	Larghezza del corridoio [m]	1,3
$\text{width}_{\text{cell}}$	Larghezza della cella (larghezza unità di carico più franchi addizionali) [m]	0,9
$\text{weight}_{\text{plate}}$	Peso della lastra di acciaio per la soletta di chiusura [kg/m^2]	15,7

Configurazione degli AS/RS refrigerati

In questo capitolo si affronta il problema della progettazione di un AS/RS refrigerato (Refrigerated Automated Storage and Retrieval System, R-AS/RS), tipologia di magazzino che ha trovato ampio impiego negli ultimi anni nel settore alimentare per la conservazione di prodotti surgelati.

Nel par. 7.1 si analizzerà il ruolo nelle cold chain e le caratteristiche di tali sistemi, mentre nel par. 7.2 verrà introdotto un nuovo modello di ottimizzazione, che considera un sistema di movimentazione con satellite a controllo remoto lungo le corsie a profondità multipla e tiene conto dei costi energetici di refrigerazione e movimentazione. Nel par. 7.3 verranno riportati i risultati relativi ad una caso di riferimento, mentre nel par. 7.3.1 verrà analizzato l'impatto delle variabili di supply chain sulla configurazione e i costi del magazzino. Le conclusioni saranno infine riassunte nel par. 7.4.

7.1 Gli AS/RS e le cold chain

La refrigerazione riveste un ruolo importante per garantire la sicurezza e la qualità degli alimenti, nonché per assicurarne la distribuzione in un territorio sempre più urbanizzato. Come stimato da James and James (2010), infatti, il 40% del cibo prodotto necessita di refrigerazione, per una percentuale pari al 15% dell'intero consumo mondiale di energia elettrica.

Dati i crescenti costi di approvvigionamento di energia e le emissioni di gas serra clima-alteranti derivanti dalla sua generazione, appare evidente come l'efficienza energetica possa costituire un efficace strumento di SSCM (par. 1.1) anche per il settore alimentare.

Lo stoccaggio refrigerato (*cold storage*) è stato indicato come il quarto tra i dieci principali processi (James et al., 2009) aventi il più grande potenziale di risparmio energetico nell'ambito della catena del freddo. I principali in-

terventi, tuttavia, sono stati evidenziati pressoché esclusivamente nel campo della manutenzione dei magazzini, come ad es. la corretta sigillazione delle porte e la pulizia periodica dei condensatori. Per quanto concerne invece la progettazione fisica, l'attenzione è stata riposta essenzialmente nella selezione dell'appropriato spessore degli isolanti e nel corretto dimensionamento dell'impianto di refrigerazione, ma la configurazione del sistema di stoccaggio appare, invece, largamente trascurata.

I vantaggi intrinseci degli AS/RS (MHIA, 2009) assumono una rilevanza ancor più importante se inseriti nel contesto delle cold chain; la capacità di stoccare più densamente i carichi, infatti, consente una riduzione del volume dell'ambiente da refrigerare, con benefici diretti sulla potenza richiesta all'impianto di refrigerazione. Il poter ridurre drasticamente la presenza di personale in ambienti con temperature proibitive (si pensi al range di valori tipici dei magazzini per prodotti surgelati, con temperature tra i -23°C to -29°C (Owen, 2010a)), rende i magazzini automatizzati come soluzioni preferenziali rispetto a sistemi di stoccaggio con più elevato contenuto manuale/meccanizzato.

Come già evidenziato nel precedente cap. 6, tuttavia, poca enfasi è stata dedicata dalla letteratura all'ottimizzazione della progettazione fisica degli AS/RS rispetto all'ampio spazio riservato, invece, alle politiche di controllo (Baker and Canessa, 2007; Gu et al., 2010; Gagliardi et al., 2012a). L'unico lavoro dedicato espressamente agli AS/RS refrigerati è quello di Hwang et al. (1999), che aggiunge alla funzione obiettivo del modello base di Karasawa et al. (1980) (si veda par. 6.2) il costo d'investimento dell'impianto di refrigerazione necessario a fronteggiare il carico termico. Comunemente alla maggior parte dei modelli, la scaffalatura viene rappresentata come una porzione rettangolare di spazio nel continuo, con la stazione di I/O posizionata all'angolo inferiore; si assume inoltre un moto rettilineo uniforme per descrivere i movimenti del trasloelevatore, secondo il modello classico di Bozer and White (1984). Per consentire maggiore capacità di stoccaggio, la scaffalatura viene intesa a doppia profondità con selettività unitaria, ovvero con unità di carico dello stesso codice stoccate in profondità (*lane*).

Poiché il costo della refrigerazione è legato al volume della cella da condizionare e quindi appare opportuno ricercare soluzioni di stoccaggio le più compatte possibili, nel presente capitolo verrà proposto un modello di ottimizzazione della configurazione di sistema, che considera le nuove opportunità legate all'introduzione sul mercato dei sistemi satellite e delle scaffalature a profondità multipla. Per promuovere delle soluzioni di stoccaggio sostenibili, inoltre, non si considererà come dato l'edificio in cui accomodare un R-AS/RS, ma si penserà di costruirlo ex-novo, ottimizzando così congiuntamente anche le superfici esterne della struttura e i volumi risultanti, che saranno quindi modellizzati come variabili e non come vincoli.

7.2 Il modello di ottimizzazione per R-AS/RS sostenibili

I principali interrogativi a cui un progettista di R-AS/RS si trova a dover rispondere durante lo studio di fattibilità del sistema sono:

- Quale profondità delle corsie (*lane depth*) è maggiormente adeguata alla politica di rifornimento del magazzino stabilita dal food supply chain (FSC) manager?
- Quanti livelli verticali di u.d.c. e quante colonne a profondità multipla per ciascun corridoio di servizio consentono di garantire la capacità di stoccaggio richiesta dal FSC manager?
- Quanti corridoi e trasloelevatori sono necessari per soddisfare il throughput richiesto per una dato livello di produttività del sistema?

Dalla loro considerazione emergono le variabili decisionali chiave del modello, ovvero:

- **depth**: numero di u.d.c. pallettizzate stoccate in profondità lungo una corsia per livello;
- **col**: numero di colonne a profondità multipla lungo un fronte del corridoio;
- **levels**: numero di livelli della scaffalatura;
- **aisles**: numero di corridoi e conseguentemente numero di trasloelevatori per configurazioni *aisle-captive*.

Le variabili ausiliarie, quali la lunghezza trasversale e longitudinale, l'altezza, il volume e le superfici necessarie a configurare completamente un R-AS/RS possono essere facilmente calcolate a partire dalle variabili decisionali e dai parametri di input (per es. le dimensioni h , w , l dell'u.d.c., le esigenze di circolazione dell'aria, le specifiche da cataloghi fornitore per gli elementi della scaffalatura, lo spazio richiesto per carico/scarico merce dal trasloelevatore fuori corridoio, ecc.). L'elenco completo dei simboli e dei valori dei parametri utilizzati nel modello è stato riportato nella tabella in appendice alla fine del capitolo.

Fissando opportunamente il dominio delle variabili decisionali, è possibile creare un numero finito C di potenziali configurazioni del sistema, che il solver dovrà processare per identificarne la migliore.

Per quanto concerne la profondità delle corsie, l'insieme dei possibili valori va scelto sulla base dei lotti di rifornimento dei vari prodotti da conservare

e dipendono quindi strettamente dalle politiche della FSC. Poiché nei sistemi a profondità multipla è opportuno stoccare u.d.c. dello stesso codice lungo una corsia per preservarne la selettività unitaria (ovvero la capacità di accedere direttamente al prodotto senza dover spostare u.d.c. di altri codici), ne deriva che solo i sottomultipli dei vari lotti di rifornimento debbano essere considerati. A questo va aggiunto come i fornitori considerino una profondità di 3 u.d.c. come valore minimo per proporre sistemi a satellite, anziché soluzioni tradizionali con sole forche telescopiche per servire i vani. Come suggerito da costruttori locali di sistemi satellite, inoltre, la massima lunghezza della corsia considerata fattibile si attesta sui 40 m; a questa si devono aggiungere le limitazioni sul massimo sviluppo orizzontale del sistema indotte dal raggio di copertura degli aircoolers.

Il numero minimo di livelli, invece, è legato all'altezza che rende opportuno passare dai carrelli a forche ai trasloelevatori, nonché alla necessità di massimizzare l'utilizzo dello spazio; il limite superiore, invece, per quanto siano stati realizzati AS/RS con oltre 54 m di altezza (Morton, 2009), è dettato da una corretta circolazione dell'aria che deve essere garantita nelle celle refrigerate.

Limitazione ai domini delle variabili decisionali possono poi essere introdotte dalle dimensioni effettive dell'edificio se preesistente e dalla capacità portante del pavimento.

Una volta generato l'insieme delle alternative progettuali, in un'ottica di efficienza energetica è necessario poter associare a ciascuna di esse il consumo di energia richiesto sia per la movimentazione del trasloelevatore e del satellite, sia per mantenere la corretta temperatura di conservazione all'interno della corrispondente cella frigorifera di stoccaggio, come verrà approfondito nel successivo paragrafo 7.2.1.

Il modello è stato implementato e risolto tramite l'approccio del Constraint Programming e l'adozione del software Comet; le ragioni per la loro adozione sono le medesime già esplicitate nel cap. 5.

7.2.1 Energy models

Per stimare il consumo di energia legato alla movimentazione dei prodotti, è possibile sommare i fabbisogni di energia calcolati separatamente per ciascuna macchina coinvolta, ovvero il trasloelevatore e il satellite.

Per quanto concerne il modello di energia del trasloelevatore, si farà riferimento a quanto descritto nel cap. 2; adottando una politica di allocazione random sul fronte della scaffalatura, similmente a quanto discusso nel precedente capitolo, ogni locazione ha la medesima probabilità di essere visitata e quindi è sufficiente calcolare la media aritmetica delle energie per le singole locazioni per ottenere l'energia media di ciclo del trasloelevatore. L'energia totale richiesta nell'intervallo di pianificazione sarà in seguito ottenuta moltiplicando tale valore per il throughput di sistema.

I sistemi satellite a servizio della scaffalatura a profondità multipla sono costituiti essenzialmente da una macchina con batteria ricaricabile a controllo remoto, capace di posizionare in profondità i singoli pallet da stoccare, prelevarli dalla posizione di stoccaggio e ripresentarli in testa alle corsie, tutto in modo automatico (si veda figura 1.5).

Data la minor complessità della macchina satellite rispetto al trasloelevatore, si è ritenuto di elaborare dei modelli semplificati per i tempi e le energie di movimentazione all'interno delle corsie, basati sulle indicazioni fornite dai costruttori.

Si sono innanzitutto considerati due diversi valori di velocità nominale del satellite, una relativa ai movimenti con carico a bordo, l'altra per movimenti a vuoto, che sono stati poi applicati alle lunghezze degli spostamenti medi richiesti lungo le corsie (a diversa profondità in base alla configurazione di scaffalatura considerata di volta in volta) per ottenere i relativi tempi variabili. A quest'ultimi si sono aggiunti i tempi fissi di ciclo legati al posizionamento del satellite dentro le guide di corsa, alle operazioni di carico/scarico della merce nelle locazioni e alle accelerazioni/decelerazioni del satellite. L'energia media di ciclo è stata quindi calcolata moltiplicando il tempo medio ottenuto per il valore di potenza suggerito dai costruttori.

Per quanto riguarda, invece, l'energia richiesta dall'impianto di refrigerazione, la sua variabilità lungo l'anno dipende fortemente dall'andamento della temperatura esterna; l'anno tipo dovrebbe quindi opportunamente essere suddiviso in periodi temporali che ne riflettano il comportamento. Il numero di tali periodi deve essere scelto come compromesso tra l'esigenza di garantire un'adeguata accuratezza del modello nel rappresentare la realtà e l'impegno di risorse richiesto dal relativo processo di raccolta ed elaborazione dei dati.

Alla suddivisione temporale indotta dall'andamento della temperatura deve poi essere aggiunta quella eventualmente indotta dal sistema tariffario di acquisto dell'energia elettrica; ad es. se la fornitura prevede un costo diverso a seconda ci si trovi in giorno feriale o festivo, risulta chiaro come sia necessaria una più dettagliata articolazione dei periodi, come riportato in (Meneghetti and Nardin, 2012). Con riferimento alle regione Friuli-Venezia Giulia, a cui si riferisce il caso studio proposto nel seguito, ad esempio, si sono processati i dati orari di temperatura degli ultimi 2 anni, forniti dall'agenzia meteorologica regionale (OSMER FVG: www.osmer.fvg.it), individuando per ciascun mese dell'anno 2 periodi, indicativi approssimativamente della parte diurna e notturna del giorno tipo del mese considerato, con un costo orario costante dell'energia, ottenendo così complessivamente 24 periodi per anno (si veda la fig. 7.1), su cui articolare il modello di ottimizzazione. La durata totale in ore, nell'arco dell'anno, di ciascun periodo è stata valutata sulla base della distribuzione di temperatura nel mese considerato, da cui è derivata una diversa durata della fascia notturna e diurna per ciascun mese, moltiplicata poi per il numero di giorni/anno del mese considerato.

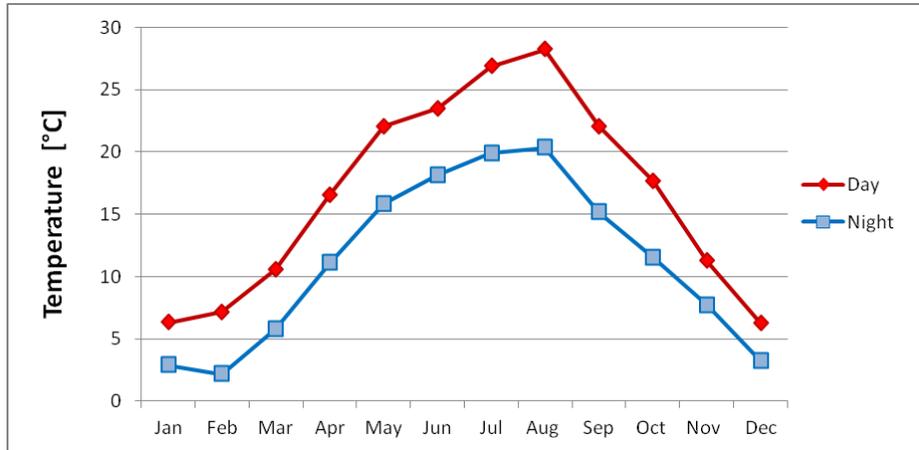


Figura 7.1. Andamento delle temperature nei 24 periodi considerati per il caso studio

Date le temperature medie esterne elaborate per ciascun periodo, è quindi possibile calcolare i carichi frigoriferi sulla base delle linee guida elaborate dall'ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers), le cui relazioni sono state direttamente introdotte nel modello, come descritto nel par. 7.2.2.

7.2.2 La funzione obiettivo

La funzione obiettivo da minimizzare è il costo totale del sistema nell'anno tipo (eq. 7.1), in linea con quanto rilevato da Seuring (2013) circa la predominanza della minimizzazione dei costi quale obiettivo perseguito dai modelli quantitativi sviluppati per le SSCM.

Nel seguito le variabili decisionali e ausiliarie saranno indicate in grassetto; la lista completa dei loro nomi è stata riportata nell'apposita tabella alla fine del capitolo. Analogamente tutti i parametri utilizzati nel modello sono stati elencati in appendice.

$$\begin{aligned}
 \min \quad & (\text{ann}_{\text{rack}} \cdot \mathbf{cost}_{\text{rack}} + \text{ann}_{\text{crane}} \cdot \mathbf{cost}_{\text{crane}} + \text{ann}_{\text{sat}} \cdot \mathbf{cost}_{\text{sat}} + \\
 & \text{ann}_{\text{guide}} \cdot \mathbf{cost}_{\text{guide}} + \text{ann}_{\text{refr}} \cdot \mathbf{cost}_{\text{refr}} + \text{ann}_{\text{build}} \cdot \mathbf{cost}_{\text{build}} + \\
 & \text{ann}_{\text{land}} \cdot \mathbf{cost}_{\text{land}}) + \mathbf{ycost}_{\text{energy}} + \mathbf{ycost}_{\text{maint}} \quad (7.1)
 \end{aligned}$$

I costi di investimento sono relativi alla scaffalatura, al sistema di movimentazione (trasloelevatori e satelliti), al sistema di guida del trasloelevatore, all'impianto di refrigerazione, all'edificio e all'acquisto del terreno. Ciascuna voce è stata relativizzata all'anno tipo mediante l'annualità equivalente (*annuity factor* ann) calcolata distintamente per ciascun elemento, in modo da tenere conto della diversa aspettativa di durata.

I costi operativi comprendono i costi annuali di approvvigionamento energetico e i costi di manutenzione. I costi relativi al personale e all'uso di carrelli per la gestione dell'interfacciamento tra la cella frigorifera e la banchina sono stati omessi perché ritenuti invarianti rispetto alle potenziali configurazioni di R-AS/RS.

I costi della scaffalatura $\mathbf{cost}_{\mathbf{rack}}$ sono dati dalla somma dei costi relativi alle spalle, ai correnti, alle guide per il satellite e alla soletta di chiusura superiore della struttura. Nelle equazioni seguenti, con h , w e l si indicheranno rispettivamente l'altezza, la larghezza e la profondità del singolo posto-pallet.

Il costo delle spalle (eq. 7.2) viene calcolato in base al costo per unità di lunghezza ($\mathbf{c}_{\mathbf{frame}}$) associabile a ciascuna tipologia presente nei cataloghi dei fornitori (si veda ad es. la tabella 7.2); poiché quest'ultima viene selezionata in base alla capacità portante richiesta, che è funzione della configurazione del sistema, $\mathbf{c}_{\mathbf{frame}}$ risulta essere una variabile ausiliaria del modello, cosiccome il numero di spalle per corsia $\mathbf{frame}_{\mathbf{lane}}$, legato alla lunghezza della lane. Il parametro $e_{\mathbf{floor}}$ viene introdotto per tener conto della lunghezza extra degli elementi necessaria a garantire il corretto sollevamento dal pavimento del primo livello di stoccaggio.

$$\mathbf{cost}_{\mathbf{frame}} = \mathbf{c}_{\mathbf{frame}} \cdot 2 \cdot \mathbf{aisles} \cdot (\mathbf{col} + 1) \cdot \mathbf{frame}_{\mathbf{lane}} \cdot (\mathbf{levels} \cdot h + e_{\mathbf{floor}}) \quad (7.2)$$

Il costo dei correnti viene calcolato (eq. 7.3) con riferimento all'impiego di elementi standard per corsie a profondità multipla (1 per ogni livello di ciascun montante), i cui costi unitari sono ricavabili dai cataloghi fornitore (si veda $c_{\mathbf{beam}}$ in tabella 7.8 in appendice).

$$\mathbf{cost}_{\mathbf{beam}} = c_{\mathbf{beam}} \cdot 2 \cdot \mathbf{aisles} \cdot \mathbf{frame}_{\mathbf{lane}} \cdot \mathbf{col} \cdot \mathbf{levels} \quad (7.3)$$

Il costo del sistema di guida per il satellite viene calcolato considerando il costo standard per unità di lunghezza per ciascuna coppia di guide ai lati della corsia ($c_{\mathbf{satguide}}$) attualmente in uso sul mercato per i sistemi a profondità multipla (eq. 7.4). La lunghezza effettiva della lane è legata alla profondità della corsia e all'ulteriore spazio ($e_{\mathbf{lane}}$) richiesto per il corretto posizionamento del satellite sulle guide.

$$\mathbf{cost}_{\mathbf{satguide}} = c_{\mathbf{satguide}} \cdot 2 \cdot \mathbf{aisles} \cdot \mathbf{col} \cdot \mathbf{levels} \cdot (\mathbf{depth} \cdot l + e_{\mathbf{lane}}) \quad (7.4)$$

Il costo della soletta di chiusura superiore viene valutato in base al costo attuale ($c_{\mathbf{upframe}}$) per unità di superficie da coprire nella parte superiore della scaffalatura (eq. 7.5). La larghezza della corsia $\mathbf{width}_{\mathbf{lane}}$ è funzione dell'ingombro della spalla, che deve a sua volta essere selezionata dal solver in base alla capacità portante richiesta, e risulta pertanto una variabile ausiliaria del modello.

$$\mathbf{cost}_{\mathbf{upframe}} = c_{\mathbf{upframe}} \cdot 2 \cdot \mathbf{aisles} \cdot \mathbf{col} \cdot \mathbf{width}_{\mathbf{lane}} \cdot (\mathbf{depth} \cdot l + e_{\mathbf{lane}}) \quad (7.5)$$

Considerando configurazioni aisle-captive, il costo dei trasloelevatori è direttamente proporzionale al numero di corridoi e dipende dall'altezza numero di livelli da raggiungere; il costo unitario $\mathbf{C}_{\text{crane}}$ cresce infatti con l'altezza dell'AS/RS a causa dei diversi motori e strutture della macchina necessari per sollevare la piattaforma (si veda la tabella 7.1). Il costo $\mathbf{C}_{\text{crane}}$ si presenta dunque come una variabile ausiliaria del modello (eq. 7.6), il cui valore viene assegnato dal solver sulla base della configurazione della scaffalatura e il mix di prodotti offerto dai fornitori, come verrà approfondito nel par. 7.2.3.

$$\mathbf{cost}_{\text{crane}} = \mathbf{aisles} \cdot \mathbf{C}_{\text{crane}} \quad (7.6)$$

Il numero di moduli satellite, che ne determina il costo totale, è legato al numero di trasloelevatori utilizzato, ma è incrementato dal coefficiente n_{sat} per tenere conto dei fabbisogni di ricarica delle batterie, che rendono inutilizzabile ciascun satellite per un dato intervallo di tempo durante il giorno (eq. 7.7).

$$\mathbf{cost}_{\text{sat}} = c_{\text{sat}} \cdot n_{\text{sat}} \cdot \mathbf{aisles} \quad (7.7)$$

Il costo del sistema di guida del trasloelevatore (eq. 7.8a) viene calcolato in base alla lunghezza del corridoio più lo spazio necessario fuori corridoio dell'AS/RS per le operazioni di carico/scarico e manutenzione della macchina (extraguide). La larghezza delle corsie in colonna (eq. 7.8b) dipende dalla dimensione dell'u.d.c. (w) e dall'ingombro dei montanti ($\mathbf{width}_{\text{frame}}$) che saranno selezionati dal solver.

$$\mathbf{cost}_{\text{guide}} = c_{\text{guide}} \cdot \mathbf{aisles} \cdot (\mathbf{col} \cdot \mathbf{width}_{\text{lane}} + \text{extraguide}) \quad (7.8a)$$

$$\mathbf{width}_{\text{lane}} = w + \mathbf{width}_{\text{frame}} \quad (7.8b)$$

Il sistema di refrigerazione deve mantenere una temperatura compresa per i prodotti surgelati tipicamente tra -23°C to -29°C (Owen, 2010a). Le grandi strutture di stoccaggio nel settore alimentare impiegano solitamente impianti di compressione ad ammoniaca e questo sembra essere il trend anche per il prossimo futuro (Tassou et al., 2010). Sulla base della comune prassi e indicazioni dei fornitori, si può stabilire un costo d'investimento (c_{refr}) per unità di volume della cella da refrigerare relativo per range volumetrico, permettendo di formulare le eqs. 7.9. La superficie a pavimento considera anche lo spazio addizionale richiesto per una corretta circolazione dell'aria (e_{air}) e per l'interfacciamento con la banchina (e_{dock}), mentre l'altezza della cella ricavabile dal numero di livelli della scaffalatura viene incrementata

dell'altezza da terra del primo livello di stoccaggio (e_{floor}) e dallo spazio libero e_{airV} richiesto verticalmente per una corretta circolazione dell'aria (si veda in appendice per i valori utilizzati dei parametri).

$$\mathbf{cost}_{\text{refr}} = C_{\text{refr}} \cdot \mathbf{area}_{\text{floor}} \cdot \mathbf{height}_{\text{cell}} \quad (7.9a)$$

$$\mathbf{area}_{\text{floor}} = \mathbf{length}_{\text{front}} \cdot \mathbf{length}_{\text{side}} \quad (7.9b)$$

$$\mathbf{length}_{\text{front}} = [2(\mathbf{depth} \cdot l + e_{\text{lane}}) + \mathbf{width}_{\text{aisle}}] \cdot \mathbf{aisles} + 2e_{\text{air}} \quad (7.9c)$$

$$\mathbf{length}_{\text{side}} = \mathbf{col} \cdot \mathbf{width}_{\text{lane}} + \mathbf{width}_{\text{frame}} + e_{\text{air}} + e_{\text{dock}} \quad (7.9d)$$

$$\mathbf{height}_{\text{cell}} = \mathbf{level} \cdot h + e_{\text{floor}} + e_{\text{airV}} \quad (7.9e)$$

Il costo dell'edificio (eq. 7.10) viene calcolato come la somma del costo dei materiali isolanti di ciascuna superficie (eq. 7.11a), del costo delle fondamenta (eq. 7.12) e del costo del sistema di riscaldamento a pavimento (eq. 7.13) necessario per evitare il fenomeno del sollevamento del pavimento stesso e delle colonne dovuto alla formazione di ghiaccio nel terreno sottostante, fenomeno comune per gli impianti a basse temperature (Owen (2010a)).

$$\mathbf{cost}_{\text{build}} = \mathbf{cost}_{\text{insul}} + \mathbf{cost}_{\text{found}} + \mathbf{cost}_{\text{heav}} \quad (7.10)$$

Il costo delle superfici per metro quadro può essere valutato sulla base della resistenza termica offerta dai pannelli sandwich e/o dagli strati di materiale isolante come il polistirene estruso/espanso o il poliuretano, proposti sul mercato con spessori standardizzati (Owen (2010b)). I costi addizionali legati alle giunture sono stati introdotti tramite il coefficiente s_{joint} .

$$\mathbf{cost}_{\text{insul}} = S_{\text{joint}} \cdot (C_{\text{roof}} \cdot \mathbf{area}_{\text{roof}} + C_{\text{floor}} \cdot \mathbf{area}_{\text{floor}} + C_{\text{wall}} \cdot (2\mathbf{area}_{\text{front}} + 2\mathbf{area}_{\text{side}})) \quad (7.11a)$$

$$\mathbf{area}_{\text{front}} = \mathbf{length}_{\text{front}} \cdot \mathbf{height}_{\text{cell}} \quad (7.11b)$$

$$\mathbf{area}_{\text{side}} = \mathbf{length}_{\text{side}} \cdot \mathbf{height}_{\text{cell}} \quad (7.11c)$$

Il costo delle fondamenta può essere stimato in base al volume dello slab di cemento armato, legato essenzialmente all'altezza dell'edificio, come espresso nelle eqs. 7.12.

$$\mathbf{cost}_{\mathbf{found}} = c_{\mathbf{slab}} \cdot \mathbf{area}_{\mathbf{floor}} \cdot \mathbf{height}_{\mathbf{slab}} \quad (7.12a)$$

$$\mathbf{height}_{\mathbf{slab}} = \begin{cases} h_{\mathbf{min}_{\mathbf{slab}}} + (\mathbf{height}_{\mathbf{cell}} - h_{\mathbf{celslab}}) \cdot dh_{\mathbf{slab}} & \text{if } \mathbf{height}_{\mathbf{cell}} > h_{\mathbf{celslab}} \\ h_{\mathbf{min}_{\mathbf{slab}}} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7.12b)$$

Il costo del sistema antigelo a pavimento viene calcolato sulla base della superficie da proteggere contro la formazione di ghiaccio (eq. 7.13).

$$\mathbf{cost}_{\mathbf{heav}} = c_{\mathbf{heav}} \cdot \mathbf{area}_{\mathbf{floor}} \quad (7.13)$$

Il costo di acquisto del terreno, infine, viene calcolato sulla base dei prezzi correnti di mercato per la sola cella refrigerata come mostrato in eq. 7.14; lo spazio necessario al parco automezzi, alla stanza di ricarica batterie, ecc. è stato infatti considerato come invariante rispetto alla configurazione dell'AS/RS e quindi non introdotto nel modello.

$$\mathbf{cost}_{\mathbf{land}} = c_{\mathbf{land}} \cdot \mathbf{area}_{\mathbf{floor}} \quad (7.14)$$

Per quanto riguarda i costi operativi, il consumo energetico per l'operatività del magazzino può essere attribuito ai fabbisogni di refrigerazione, illuminazione, movimentazione (tralelevatore e satellite) da valorizzare in base al costo di mercato $c_{\mathbf{en}}$ per kWh, come riportato in eq. 7.15.

$$\mathbf{ycost}_{\mathbf{energy}} = c_{\mathbf{en}} \cdot (\mathbf{energy}_{\mathbf{refr}} + \mathbf{energy}_{\mathbf{light}} + \mathbf{energy}_{\mathbf{move}}) \quad (7.15)$$

I fabbisogni annuali di energia per la refrigerazione sono stimati sulla base del carico frigorifero, imputabile a ciascun dei P periodi i in cui è stato discretizzato il modello, diviso il coefficiente di prestazione (COP) relativo al sistema a compressione ad ammoniaca (eq. 7.16a). Il COP può essere considerato come indice dell'efficienza di refrigerazione e viene normalmente definito come il rapporto tra calore estratto e il lavoro necessario (Owen, 2013).

I carichi frigoriferi vengono calcolati come somma del carico per la *trasmissione di calore* e per l'*infiltrazione d'aria*, del *carico dei prodotti* da conservare e del *carico interno* (Owen, 2010b), tenendo conto della temperatura media esterna di ciascun periodo T_1 (si veda la fig. 7.1) e della relativa durata annuale in ore hr_1 . Il carico complessivo viene incrementato di un opportuno coefficiente di sicurezza s e di funzionamento degli ausiliari aux (condensatore, ventilatori, ecc.).

$$\mathbf{energy}_{\text{refr}} = \text{aux} \cdot s \sum_{i \in P} \text{hr}_i \cdot \frac{\mathbf{trload}_i + \text{inflow} + \text{prodload} + \mathbf{intload}}{\text{COP}} \quad (7.16a)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{trload}_i = & \mathbf{area}_{\text{floor}} \frac{T_{\text{floor}} - T_{\text{cell}}}{R_{\text{floor}}} + \mathbf{area}_{\text{roof}} \frac{T_i + T_{\text{sun}} - T_{\text{cell}}}{R_{\text{roof}}} + \\ & \mathbf{area}_{\text{front}} \frac{T_i - T_{\text{cell}}}{R_{\text{wall}}} + \mathbf{area}_{\text{front}} \frac{T_{\text{dock}} - T_{\text{cell}}}{R_{\text{wall}}} + \\ & 2\mathbf{area}_{\text{side}} \frac{T_i - T_{\text{cell}}}{R_{\text{wall}}} \quad \forall i \in P \end{aligned} \quad (7.16b)$$

$$\text{inflow} = n_{\text{door}} \cdot 0.221A(h_{\text{in}} - h_r)\rho_r(1 - \rho_{\text{in}}/\rho_r)^{0.5}(gH)^{0.5}F_m[D_f D_t(1 - E_f)] \quad (7.16c)$$

$$\text{prodload} = \text{Pace}/2 \cdot \text{weight}_{\text{prod}} \cdot \text{SH}_{\text{prod}} \cdot |T_{\text{cell}} - T_{\text{prod}}| \quad (7.16d)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{intload} = & \text{Pace} \cdot (\mathbf{en_cycle}_{\text{crane}} + \mathbf{en_cycle}_{\text{sat}}) + \frac{\text{power}_{\text{truck}}}{\text{eff}_{\text{truck}}} \\ & + n_{\text{fan}} \frac{\text{power}_{\text{fan}}}{\text{eff}_{\text{fan}}} + \text{light} \cdot \mathbf{area}_{\text{floor}} \end{aligned} \quad (7.16e)$$

Il carico di trasmissione per ciascun periodo i relativo al calore sensibile attraverso le superfici viene calcolato come in eq. 7.16b. La temperatura a cui deve essere mantenuta la cella T_{cell} dovrebbe essere scelta in base al livello di qualità del prodotto che si vuole garantire lungo l'intera food supply chain (Rong et al., 2011; Zanoni and Zavanella, 2012); l'area della banchina nei magazzini refrigerati viene invece comunemente mantenuta ad una temperatura costante T_{dock} , in modo da proteggere i prodotti durante le operazioni di carico/scarico fuori dalla cella frigorifera. La temperatura esterna sul tetto viene incrementata di T_{sun} per tener conto dell'insolazione; i valori di resistenza termica R di ciascuna superficie, infine, dovrebbero essere selezionati sulla base delle linee guida esistenti (Owen, 2010a) e dei recenti risultati della letteratura (Richman et al., 2009). I valori adottati in questo studio sono stati riportati nella tabella dei parametri in appendice.

Sia i carichi d'infiltrazione d'aria sia quelli indotti dal prodotto possono essere considerati in realtà come invarianti rispetto alla configurazione del sistema; tuttavia, poiché il modello intende essere uno strumento di supporto alle decisioni, la loro introduzione nell'eq. 7.16a potrebbe rivelarsi utile nell'analisi di sensitività atta a valutare l'impatto sui costi di alcuni parametri

stabiliti a livello di supply chain, come la temperatura di ingresso a magazzino dei prodotti, la temperatura di stoccaggio o il throughput richiesto al sistema.

Il carico per infiltrazione d'aria (eq. 7.16c) viene calcolato sulla base delle raccomandazioni ASHRAE (Owen, 2010b) in riferimento alle dimensioni delle porte, all'entalpia (h_{in} , h_r) e densità (ρ_{in} , ρ_r) dell'aria in ingresso e nella cella ricavabili dal diagramma psicrometrico, dal fattore di flusso delle porte, etc. (si rimanda alla tabella in appendice per i simboli e i valori adottati). La frazione di tempo D_t può essere stimata come il prodotto del throughput di sistema e il tempo in cui le porte rimangono aperte per il transito dei carrelli; essa dipende fortemente dal numero di porte n_{door} di interfaccia tra la cella frigorifera e la banchina e gli eventuali reparti produttivi.

Il carico frigorifero indotto dal prodotto (eq. 7.16d) è relativo al calore che deve essere sottratto per portare i prodotti già surgelati alla temperatura di mantenimento in cella; viene calcolato come il flusso in entrata (assunto pari a metà del numero di transazioni totali richieste al magazzino nell'unità di tempo (Pace) moltiplicato la massa dell'unità di carico), il calore specifico del prodotto SH_{prod} (si veda Owen (2010c) per i diversi alimenti) e la differenza di temperatura.

Il carico interno in un R-AR/RS (eq. 7.16e) è legato principalmente all'energia dissipata nello spazio refrigerato dai motori dei trasloelevatori, dai satelliti, dai carrelli, dai ventilatori degli aircooler e dalle luci. Quest'ultimo può essere stimato in base al livello di illuminazione desiderato e alla superficie a pavimento, mentre gli altri possono essere stimati in base al consumo di energia elettrica e al throughput di sistema (Pace) o in base alla potenza nominale dei motori e alla loro efficienza.

Per quanto concerne l'energia per l'illuminazione da inserire nel calcolo dei costi operativi, essa può essere stimata moltiplicando il relativo carico per il numero di ore di funzionamento annuo (eq. 7.17).

$$\mathbf{energy}_{light} = light \cdot \mathbf{area}_{floor} \cdot hr_{year} \quad (7.17)$$

I fabbisogni annuali di energia per i movimenti dei trasloelevatori e dei satelliti possono essere stimati in base al throughput orario di sistema, all'energia media per ciclo e al numero di ore/anno di funzionamento (eq. 7.18).

$$\mathbf{energy}_{move} = Pace \cdot (\mathbf{en_cycle}_{crane} + \mathbf{en_cycle}_{sat}) \cdot hr_{year} \quad (7.18)$$

I costi di manutenzione, infine, sono stati calcolati come percentuale c_{maint} del costo di investimento per l'impianto di refrigerazione e il trasloelevatore come da prassi, mentre è stato aggiunto un costo per spalla c_{maint_fr} per aderire alla legislazione europea sulle ispezioni obbligatorie e le riparazioni della scaffalatura, che rivestono un ruolo particolarmente importante per strutture a basse temperature (eq. 7.19).

$$\mathbf{ycost}_{\text{maint}} = c_{\text{maint}} \cdot (\mathbf{cost}_{\text{crane}} + \mathbf{cost}_{\text{refr}}) + c_{\text{maint_fr}} \cdot [2 \cdot \mathbf{aisles} \cdot (\mathbf{col} + 1) \cdot \mathbf{frame}_{\text{lane}}] \quad (7.19)$$

7.2.3 Constraints

Si riportano di seguito i vincoli maggiormente rappresentativi del modello; si rimanda alle tabelle in appendice per la lista completa delle variabili e dei parametri coinvolti.

La capacità di stoccaggio richiesta StorCap deve essere soddisfatta, come espresso nell'eq. 7.20; per permettere una maggiore flessibilità nell'identificazione della soluzione a costo minimo, ma anche per essere più aderenti alla pratica professionale, è stato introdotto un coefficiente overS della sovracapacità consentita.

$$\text{StorCap} \leq 2 \cdot \mathbf{col} \cdot \mathbf{depth} \cdot \mathbf{levels} \cdot \mathbf{aisles} \leq \text{overS} \cdot \text{StorCap} \quad (7.20)$$

Per preservare la selettività unitaria, il numero di u.d.c. entro una corsia a profondità multipla deve essere un sottomultiplo del massimo comun divisore dei lotti di rifornimento dei diversi prodotti da gestire (eq nell'eq. 7.21); in tal caso, infatti, le u.d.c. stoccate in corsia appartengono allo stesso codice e quindi un prodotto può essere recuperato dalla prima locazione disponibile senza dover spostare altre u.d.c. Tale vincolo, tuttavia, può essere rimosso qualora i fabbisogni di spazio o un basso turnover suggeriscano valori inferiori di selettività.

$$\text{eq mod } \mathbf{depth} = 0 \quad (7.21)$$

Un'altra problematica da affrontare è la corretta assegnazione della tipologia di trasloelevatore a ciascuna configurazione generata dal solver, da cui dipendono sia i costi di investimento della macchina sia i consumi energetici. A tal fine, il range del possibile numero di livelli in un R-AS/RS è stato stratificato in base all'altezza da servire, sulla base delle indicazioni dei fornitori; le K classi di scaffalatura risultanti e le relative specifiche del trasloelevatore necessarie per il calcolo dei tempi e delle energie di ciclo sono riportate in tabella 7.1.

Per poter processare tutte le possibili configurazioni con tempi computazionali accettabili, si è generata per ciascuna classe la più grande scaffalatura possibile, identificata dalla variabile ausiliaria **rack** (ad es. con riferimento alla tab. 7.1, una scaffalatura di 7 livelli e 60 colonne per la prima classe, 10 livelli and 60 colonne per la seconda, ecc.). Queste k scaffalature sono state pre-processate dai programmi che implementano i modelli di tempo

Tabella 7.1. Suddivisione delle possibili scaffalature e relative specifiche dei trasloelevatori: numero minimo e massimo di livelli per tipo, velocità e accelerazioni nominali per ciascun asse, peso della macchina e costo.

Classe scaff.	Livelli		Specifiche traslo				Massa [kg]	Costo [€]
	min	max	v_x [m/s]	a_x [m/s ²]	v_y [m/s]	a_y [m/s ²]		
1	5	7	4,0	0,8	0,9	0,8	11100	175.000
2	8	10	3,0	0,4	0,9	0,8	13050	200.000
3	11	12	3,0	0,4	0,9	0,6	15000	225.000
4	13	15	3,0	0,4	0,9	0,6	16950	250.000

ed energia illustrati nel cap. 2 in modo da poter calcolare il tempo medio di stoccaggio/prelievo ($\text{rack_time}_{i,j,k}$) e l'energia ($\text{rack_en}_{i,j,k}$) per ciascuna locazione (i, j) ; i relativi valori sono stati quindi passati come parametri di input al modello di ottimizzazione. Introducendo i vincoli nelle equazioni 7.22 è possibile associare ad ogni configurazione elaborata dal solver la propria classe k di appartenenza (eq. 7.22a) sulla base dei dati in tab. 7.1. Vengono introdotte a tale scopo le variabili booleane $\mathbf{b}_{i,j}$, il cui dominio insiste sulle massime dimensioni ammesse per la scaffalatura (ad es. $i \in [1..15]$ e $j \in [1..60]$, come ragionevole per un R-AS/RS); se una locazione (i, j) appartiene alla scaffalatura processata, allora la corrispondente $\mathbf{b}_{i,j}$ verrà attivata (ovvero posta a 1, eq. 7.22b). Le variabili ausiliarie $\mathbf{crane_t}_{i,j,k}$ (si vedano eqs. 7.22c) e $\mathbf{crane_en}_{i,j,k}$ (eq. 7.22d) permettono di recuperare i valori di tempo ed energia pre-elaborati tramite i modelli del cap. 2 per ogni locazione (i, j) appartenente alla classe di scaffalature k .

Il tempo medio di ciclo del trasloelevatore per una determinata scaffalatura e politica di stoccaggio casuale viene calcolato tramite la eq. 7.22e, mentre il consumo energetico medio per ciclo tramite la eq. 7.22f, aggiungendo i fabbisogni fissi di tempo ed energia legati ai movimenti lungo l'asse z (ad es. il ciclo forche per il posizionamento del satellite entro le guide di corsa).

$$\min_level_k \leq \mathbf{levels} \leq \max_level_k \Rightarrow \mathbf{rack} = k \quad \forall k \in [1..K] \quad (7.22a)$$

$$\mathbf{b}_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{if } (i \leq \mathbf{levels}) \wedge (j \leq \mathbf{col}) \quad \forall (i, j) \in ([1..\max_{lev}], [1..\max_{col}]) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7.22b)$$

$$\mathbf{crane_t}_{i,j,k} = \begin{cases} \text{rack_time}_{i,j,k} & \text{if } (\mathbf{b}_{i,j} = 1) \wedge (\mathbf{rack} = k) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \forall (i, j, k) \in ([1..\max_{lev}], [1..\max_{col}], [1..K]) \quad (7.22c)$$

$$\mathbf{crane_en}_{i,j,k} = \begin{cases} \mathbf{rack_en}_{i,j,k} & \text{if } (\mathbf{b}_{i,j} = 1) \wedge (\mathbf{rack} = k) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \forall(i, j, k) \in ([1..\mathbf{max}_{lev}], [1..\mathbf{max}_{col}], [1..K]) \quad (7.22d)$$

$$\mathbf{t_cycle}_{\mathbf{crane}} = \sum_{i,j,k} \mathbf{crane_t}_{i,j,k} / (\mathbf{levels} \cdot \mathbf{col}) + \mathbf{t_cycle}_{\mathbf{forks}} \quad (7.22e)$$

$$\mathbf{en_cycle}_{\mathbf{crane}} = \sum_{i,j,k} \mathbf{crane_en}_{i,j,k} / (\mathbf{levels} \cdot \mathbf{col}) + \mathbf{en_cycle}_{\mathbf{forks}} \quad (7.22f)$$

Il tempo medio di ciclo del satellite necessario a servire una corsia con **depth** u.d.c. può essere stimato tramite l'eq. 7.23, in base alla velocità media con carico a bordo ($v_{\text{sat}_{\min}}$) e a vuoto ($v_{\text{sat}_{\max}}$) e ai tempi fissi di ciclo Tf_{sat} relativi al posizionamento del satellite, carico u.d.c. a bordo e scarico, accelerazioni/decelerazioni all'interno della corsia. L'energia media richiesta per i movimenti del satellite viene calcolata, invece, moltiplicando la potenza media per il tempo di ciclo (eq. 7.24).

$$\mathbf{t_cycle}_{\mathbf{sat}} = (1 \cdot \mathbf{depth} / 2 + e_{\text{lane}}) \cdot (1/v_{\text{sat}_{\min}} + 1/v_{\text{sat}_{\max}}) + Tf_{\text{sat}} \quad (7.23)$$

$$\mathbf{en_cycle}_{\mathbf{sat}} = \mathbf{power}_{\mathbf{sat}} \cdot \mathbf{t_cycle}_{\mathbf{sat}} \quad (7.24)$$

Fissato l'indice di utilizzo e disponibilità del sistema eff_{ASRS} , tutti i tempi di ciclo dei mezzi di movimentazione (trasloelevatore, satellite, forche per inserimento satellite in corsia e carrello a forche per interfacciamento con la banchina) associabili ad una data configurazione del sistema, affinché quest'ultima sia una soluzione ammissibile, devono garantire il soddisfacimento del throughput richiesto al sistema stesso (eq. 7.25).

$$\frac{\text{eff}_{\text{ASRS}}}{\mathbf{t_cycle}_{\mathbf{crane}} + \mathbf{t_cycle}_{\mathbf{sat}} + \mathbf{t_cycle}_{\mathbf{forks}} + \mathbf{t_cycle}_{\mathbf{truck}}} \geq \text{Pace} \quad (7.25)$$

Data una configurazione della scaffalatura, le tipologie di montanti, correnti e guide satellite devono essere opportunamente selezionate dai cataloghi fornitori; mentre gli ultimi due elementi sono standardizzati per corsie multiple-deep e quindi la loro scelta è obbligata, l'individuazione delle spalle è più complessa, essendo legata alla diversa capacità di carico (u.d.c., correnti, guide e satellite) richiesta da ciascuna configurazione di scaffalatura.

Tabella 7.2. Specifiche delle spalle utilizzate nel caso studio

Tipo spalla	Capacità max [kg]	Costo [€/m]	Larghezza [mm]
A	18000	49,6	120
B	24300	73,6	120
C	31500	85,6	120
D	36000	99,2	120
E	44000	74,4	160

Basandosi sui suggerimenti forniti dai costruttori di scaffalature, si assume che ciascuna spalla possa supportare n_{ul} u.d.c. per ciascun livello, arrivando dunque all'eq. 7.26 che vincola la scelta del tipo spalla alla capacità portante richiesta.

$$\mathbf{Qmax}_{\text{frame}} > \text{levels} \cdot [n_{ul} \cdot (\text{weight}_{\text{prod}} + \text{weight}_{\text{satguide}} \cdot l) + \text{weight}_{\text{beam}}] + \text{weight}_{\text{sat}} \quad (7.26)$$

La capacità portante massima $\mathbf{Qmax}_{\text{frame}}$ per ciascun tipo di spalla ($\mathbf{type}_{\text{frame}}$) è stata desunta dai cataloghi fornitori (si veda tab.e 7.2); quest'ultimi sono facilmente introducibili nel modello grazie alla tipologia di vincolo “table constraint” fornita dal COMET, che vincola tre variabili ad assumere valori coerenti con le triple presenti in una tabella passata come parametro. Le varie specifiche delle opzioni disponibili sono state convertite in queste tabelle (ad es. FrameTable in eq. 7.27), che consentono dunque di forzare le variabili ad assumere valori coerenti con la effettiva disponibilità di componenti sul mercato, generando dunque soluzioni fattibili e non squisitamente teoriche, rispondendo così all'esigenza di ridurre il gap tra i modelli teorici della letteratura, la pratica professionale e l'offerta di componenti sul mercato evidenziata da Gu et al. (2010).

$$[\mathbf{Qmax}_{\text{frame}}, \mathbf{width}_{\text{frame}}, \mathbf{cost}_{\text{frame}}] = \text{FrameTable}[\mathbf{type}_{\text{frame}}] \quad (7.27)$$

7.3 Risultati

Come caso di riferimento è stato selezionato un R-AS/RS per prodotti alimentari surgelati da ubicare nel Nord-Est Italia; tutti i valori dei parametri utilizzati sono riportati nell'apposita tabella in appendice al capitolo, mentre i dati di temperatura esterna della zona sono quelli già illustrati nella fig. 7.1.

La capacità di stoccaggio richiesta è stata posta pari a 4800 u.d.c. con un fattore di sovradimensionamento consentito pari al 5%. Il massimo comune divisore dei lotti di rifornimento è stato posto a 16: di conseguenza la profondità possibile delle corsie per consentire selettività unitaria è di 4, 8 o 16

u.d.c. Si sono inoltre imposte una altezza massima di 15 livelli per garantire una corretta circolazione dell'aria e una lunghezza/larghezza massima della cella refrigerata pari a 100 m.

Il solver ha generato 84 possibili configurazioni, individuando la soluzione ottima in 2,4 s su un computer portatile Windows7 64 bit 2.4 GHz.

La configurazione migliore è caratterizzata da corsie profonde 16 u.d.c., 6 livelli in altezza, 25 colonne e 1 solo corridoio. Si tratta dunque di una scaffalatura compatta, che corrisponde alla massima profondità ammissibile per la selettività unitaria; lo sviluppo verticale risulta limitato, giacché maggiori altezze implicherebbero un incremento del costo delle spalle in virtù dei maggiori carichi da sopportare e dello sviluppo verticale e dei trasloelevatori, la cui struttura e costo cresce con il numero di livelli da servire; tale incremento non è sufficientemente compensato dalla riduzione della superficie a pavimento e della copertura del capannone.

Se si considera la struttura dei costi della soluzione ottima (fig. 7.2), si può notare come i costi energetici corrispondano a più del 27% dei costi totali anni del sistema (fig. 7.2), maggiormente imputabili ai fabbisogni di refrigerazione. Relativamente a quest'ultimi, il consumo energetico dovuto al carico di trasmissione, principalmente legato alle superfici dell'edificio e dunque alla configurazione R-AS/RS, rappresenta più del 16% del fabbisogno totale (si veda fig. 7.3). Grazie al controllo della velocità dei trasloelevatori di ultima generazione, invece, l'energia richiesta per gli spostamenti del trasloelevatore è piuttosto contenuta, con una magnitudine pari a quella dell'illuminazione, in linea con quanto affermato dai professionisti del settore.

Se si confronta la soluzione ottima con configurazioni a maggior sviluppo verticale, come quelle generate dal solver quando l'utente imponga di trovare la miglior soluzione con altezza prefissata (ad es. specificando 10, 12 e 15 livelli, ovvero una scaffalatura per ciascuna classe tra quelle identificate in tab. 7.1) si ottiene la fig. 7.4. Muovendosi verso configurazioni a maggiore altezza, la variazione principale si registra nel costo della scaffalatura, con un incremento relativo alla soluzione ottima rispettivamente del 24,6%, 30,1% e 43,5%, che può essere attribuito sia alla maggior capacità portante sia alla maggiore altezza richiesta ai montanti, con conseguente impatto sul costo delle spalle. Il costo d'investimento del sistema di movimentazione (trasloelevatore più satellite) aumenta in virtù del maggior peso della struttura e delle diverse prestazioni dei motori necessari per raggiungere i livelli più alti (+10,8%, +22,1% e +33%, spostandosi rispettivamente da 6 livelli a 10, 12 e 15). Il costo d'acquisto del terreno registra, invece, un andamento opposto, poiché i magazzini sviluppati verticalmente richiedono ovviamente una minor occupazione superficiale (-33,3%, -41% e -50,3% per i tre livelli specificati); il costo dell'edificio beneficia della minor estensione di pavimento e copertura, ma risente del maggior costo per le fondamenta, che cresce con l'altezza del magazzino, con un incremento finale pari rispettivamente al 4%, 10,6% e 14,7%.

Per quanto concerne il consumo energetico, le differenti scaffalature influenzano principalmente i fabbisogni per le movimentazioni e l'illuminazione, come riportato in tabella 7.3; mentre la configurazione con 10 livelli consente un risparmio di energia per il trasloelevatore pari al 3.9% rispetto alla soluzione ottima grazie allo sfruttamento della forza peso, le scaffalature con 12 e 15 livelli individuate dal solver sono caratterizzate da minor profondità delle corsie e maggior sviluppo del fronte parallelo al corridoio, con relativo incremento del fabbisogno energetico per i movimenti del trasloelevatore rispettivamente del 33,8% e 48,4%. Il consumo del satellite, essendo legato alla profondità delle corsie da servire, diminuisce invece del 21.8% passando da 16 posti pallet a 8 posti pallet in profondità, come richiesto dalle soluzioni più verticali; l'illuminazione, infine, che risulta dipendere dalla superficie a pavimento, mostra un risparmio energetico per le soluzioni con maggior numero di livelli pari rispettivamente al 33,3%, 41% e 50,3%.

Il diverso impatto finale sul costo annuale delle diverse componenti di costo esaminate risente della diversa vita attesa in base alla quale è stato calcolato il rispettivo *annuity factor*; passando dalla soluzione ottima a 6 livelli alle configurazioni con 10, 12 e 15 livelli il costo finale annuo aumenta rispettivamente di 1,2%, 5,7% e 9,2% (si veda fig. 7.4).

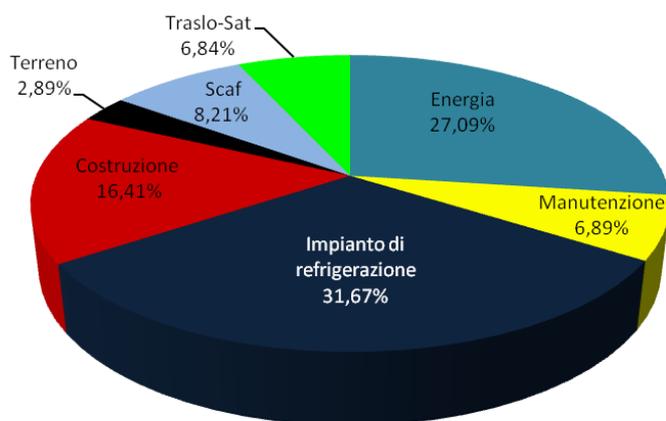
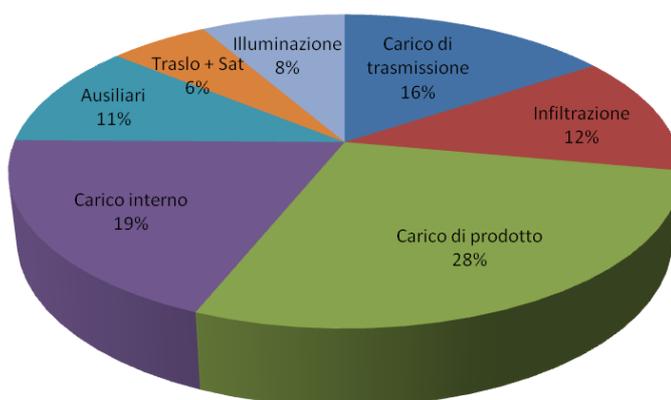
La soluzione ottima prevede un solo corridoio di servizio e quindi un solo trasloelevatore; la scelta del corretto numero di trasloelevatori, tuttavia, dovrebbe tener conto non solo dei costi ma anche dell'indicatore di disponibilità di sistema che ne consegue. Si è dunque fatto variare il fattore di utilizzo e disponibilità di sistema (si veda eq. 7.25) al di sotto del valore base di 0.85, in modo da identificare il valore che indice il solver a selezionare una configurazione di magazzino a 2 corridoi per poter garantire il soddisfacimento del throughput richiesto all'AS/RS; tale valore è risultato pari a 0,67. In questo caso la soluzione ottima diventa una configurazione a 2 corridoi, profondità 8 u.d.c., 25 colonne e 6 livelli, con un costo annuale maggiore di 11,4% rispetto allo scenario base. Il modello di ottimizzazione proposto può dunque essere utilizzato per valutare le diverse opzioni offerte dai fornitori introducendo i diversi valori di disponibilità e di costo associati alle macchine e valutandone l'impatto sul costo complessivo del sistema; analogamente si può stimare l'influenza del diverso utilizzo del sistema sui costi da sostenere.

7.3.1 Impatto delle variabili decisionali di supply chain

Analizzando la struttura del fabbisogno energetico (fig. 7.3) appare evidente come il 40% dell'energia richiesta (ovvero quella relativa al product load e all'infiltration load) sia invariante rispetto alla configurazione del magazzino automatizzato, ma dipenda invece dalle decisioni di supply chain. Sia il carico frigorifero indotto dal prodotto che dalla infiltrazione d'aria dipendono, infatti, strettamente dalla temperatura di conservazione a cui deve essere mantenuta la cella refrigerata (si vedano eqs. 7.16c e 7.16d); in tab. 7.4 viene

Tabella 7.3. Impatto dello sviluppo verticale sulle componenti di costo del sistema

Fabbisogno energetico	Livelli della scaffalatura			
	6	10	12	15
Ciclo medio trasloelevatore [kJ]	388	373	519	576
Ciclo medio satellite [kJ]	24	24	19	19
Movimentazione [kWh/yr]	43.283	41.683	56.516	62.471
Illuminazione [kWh/yr]	62.748	41.832	37.044	31.199
Refrigerazione [kWh/yr]	624.506	600.963	615.642	615.587

**Figura 7.2.** Struttura dei costi annui della soluzione ottima**Figura 7.3.** Struttura del fabbisogno energetico per la soluzione ottima

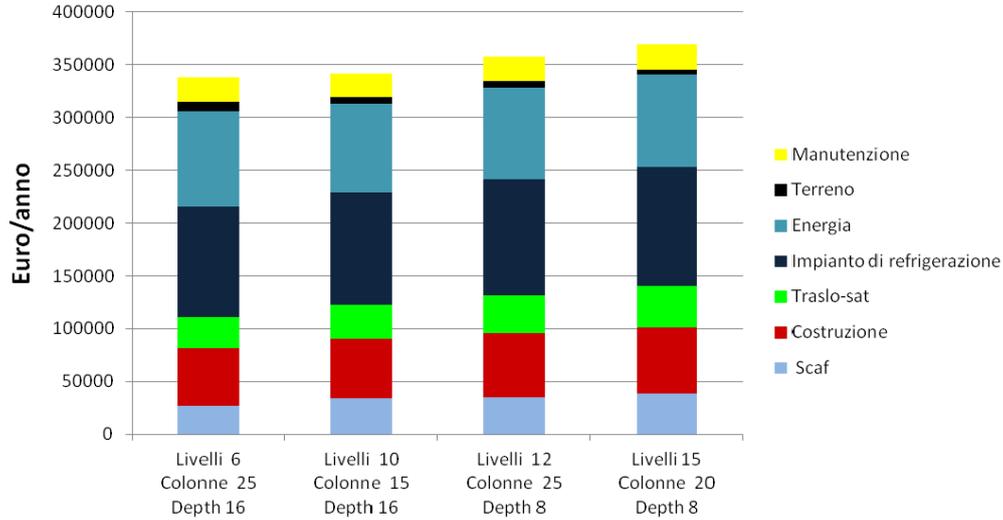


Figura 7.4. Costi annuali per le soluzioni ottimali con specificato numero di livelli

riportato come debbano essere modificati i valori delle proprietà dell'aria a seconda della temperatura imposta al magazzino.

Si deve inoltre considerare come anche il COP dell'impianto di refrigerazione, che incide sul fabbisogno finale di energia elettrica, dipenda dalla temperatura di cella. Il valore del COP ideale di Carnot per il ciclo di refrigerazione (Owen, 2013) può essere calcolato sulla base della temperatura di condensazione T_{cond} e della temperatura di evaporazione T_{ev} , come riportato nella successiva eq. 7.28.

$$\text{COP} = \frac{T_{\text{ev}}}{T_{\text{cond}} - T_{\text{ev}}} \quad (7.28)$$

Modificando il valore derivante dall'eq. 7.28 per tenere in considerazione le perdite di energia registrabili negli impianti ad ammoniaca effettivamente installati, è possibile ottenere i valori di COP al variare di T_{cell} riportati in tabella 7.4, qualora si assuma una differenza tra la temperatura di evaporazione e la cella di 8 K e una temperatura di condensazione pari a 35 °C.

E' stata quindi compiuta un'analisi di sensitività per valutare l'impatto delle diverse temperature di conservazione degli alimenti sul fabbisogno energetico e il costo annuo del magazzino, spostandosi da -21 °C fino a -29 °C.

La configurazione ottima dell'AS/RS rimane invariata al diminuire della temperatura di conservazione; come osservabile in tab. 7.5, il fabbisogno energetico per la refrigerazione aumenta fortemente con l'abbassarsi della temperatura di cella, superando il 53% quando si raggiungono i -29 °C ri-

Tabella 7.4. COP dell'impianto di refrigerazione e proprietà dell'aria nella cella a differenti temperature di conservazione

	Temperatura di conservazione				
	-21 °C	-23 °C	-25 °C	-27 °C	-29 °C
COP	2,28	2,20	2,11	2,04	1,96
densità dell'aria ρ_r [kg/m ³]	1,40	1,41	1,42	1,43	1,45
entalpia dell'aria h_r [kJ/kg]	-20,35	-22,50	-24,62	-26,73	-28,83

Tabella 7.5. Impatto della temperatura di conservazione T sui fabbisogni energetici e i costi annui del sistema

T cella	Energia refr. [kWh/yr]	$\Delta\%_{rel}$	Costo tot. [€/yr]	$\Delta\%_{rel}$
-21 °C	530.665	-15,0%	326.427	-3,4%
-23 °C	624.506	-	338.091	-
-25 °C	728.901	+16,7%	351.067	+3,8%
-27 °C	834.756	+33,7%	364.225	+7,7%
-29 °C	957.624	+53,3%	379.498	+12,2%

petto al valore di riferimento di -23 °C, con un impatto finale sul costo annuo di sistema pari a +12,2% rispetto alla configurazione in condizioni base. Qualora si aumentasse, invece, la temperatura di conservazione a -21 °C, si otterrebbe un risparmio energetico pari a circa il 15%, corrispondente ad un beneficio sui costi annui totali pari al 3,4%.

Questi risultati pongono in evidenza come la scelta della temperatura di conservazione sia particolarmente delicata non solo per la qualità del prodotto, ma anche per la sostenibilità del processo di immagazzinamento a freddo in tutte le dimensioni della *triple bottom line* (par. 1.1), che risultano correlate al consumo energetico.

Un'altra variabile di supply chain è il throughput assegnato al magazzino refrigerato, il quale influenza direttamente l'energia richiesta per la movimentazione (si veda eq. 7.18), il carico d'infiltrazione attraverso il fattore di apertura porte (D_t nell'eq. 7.16c), il carico frigorifero legato al prodotto (eq. 7.16d) e quello interno dovuto ai contributi del trasloelevatore e del satellite (eq. 7.16e).

Quando il throughput viene modificato dal valore base di 45 u.d.c./ora a 40 u.d.c./ora e 50 u.d.c./ora, si ottengono variazioni pari a -/+ 6.4% sul fabbisogno energetico di refrigerazione e -/+11% su quello di movimentazione, per un impatto finale sui costi annui di sistema pari a -/+1.6% (si veda tab. 7.6 per l'influenza sulle varie componenti di energia).

Le analisi condotte mostrano come il modello di ottimizzazione proposto possa essere un utile strumento di supporto alle decisioni per la progettazione non solo di un R-AS/RS, ma anche della cold supply chain in cui esso è

Tabella 7.6. Impatto del throughput di sistema sul fabbisogno energetico

Fabbisogno energetico	Throughput [cicli/ora]		
	40	45	50
Carico di prodotto [kWh/anno]	189025	212654	236282
Infiltrazione [kWh/anno]	142210	144369	146527
Carico interno [kWh/anno]	142210	144369	146527
Movimentazione [kWh/anno]	38474	43283	48093

inserito.

7.4 Conclusioni

Lo stoccaggio refrigerato riveste un ruolo determinante nella supply chain alimentare e ne determina una parte significativa del fabbisogno di energia. Date le condizioni di lavoro proibitive legate alle temperature di surgelamento, gli automated storage and retrieval systems si stanno imponendo come tipologia preferenziale per immagazzinare alimenti surgelati, da cui emerge la necessità di ottimizzarne la configurazione.

Mentre grande attenzione è stata prestata in letteratura ai costi di investimento di un R-AS/RS, i costi energetici sono stati trascurati; poiché il fabbisogno energetico del processo di conservazione influenza la sostenibilità dell'intera food supply chain, si è voluto proporre un modello di ottimizzazione della configurazione di un R-AS/RS che tenesse opportunamente conto dell'energia richiesta dalle varie alternative progettuali.

Sia i costi di investimento per l'edificio, sia quelli legati alla refrigerazione dipendono dalle superfici della cella refrigerata; il modello proposto considera pertanto le dimensioni finali della cella non come un dato di input, ma come delle variabili legate alla configurazione di sistema in termini di corridoi, colonne, corsie a profondità multipla e livelli in altezza, e ai fabbisogni indotti dalla corretta circolazione dell'aria. Per permettere l'elaborazione di soluzioni compatte proprie degli R-AS/RS, è stato introdotto il sistema di movimentazione basato su trasloelevatore e satellite con controllo remoto, non modellizzato prima in letteratura.

Si è adottato sia per la modellizzazione sia per la risoluzione del problema la metodologia del Constraint Programming, in modo da poter facilmente gestire funzioni non lineari delle variabili e potersi focalizzare sulla definizione delle proprietà richieste alla soluzione finale, piuttosto che sugli algoritmi per identificarla. L'applicazione ad un caso di riferimento ha consentito di testare le potenzialità del modello come strumento di supporto alle decisioni; esso si è dimostrato in grado di gestire diversi valori della capacità di stoccaggio e del fattore di utilizzo e disponibilità del sistema, nonché specifiche richieste dell'utente. Si è dimostrato altresì efficace nel valutare l'impat-

to delle decisioni di supply chain come la temperatura di conservazione dei prodotti, in modo tale che si possa considerare opportunamente non solo la qualità del prodotto, ma anche il fabbisogno energetico e i costi del processo di stoccaggio, così da favorire la nascita di supply chain sostenibili.

L'introduzione, infine, dei cataloghi dei fornitori per guidare la selezione dei componenti del sistema ha consentito di ridurre il gap tra i modelli teorici e la prassi progettuale, aumentando la fattibilità delle soluzioni individuate e rendendo di fatto lo strumento proposto effettivamente adottabile per la progettazione di un R-AS/RS.

Tabella 7.7. Variabili del modello

Simbolo	Descrizione
$aisles$	Numero corridoi
$area_{front}$	Area delle superfici perpendicolari all'asse corridoio
$area_{floor}$	Area a pavimento
$area_{roof}$	Area delle superfici di copertura edificio
$area_{side}$	Area delle superfici parallele all'asse corridoio
c_{crane}	Costo di un singolo trasloelevatore
c_{frame}	Costo spalla per unità di lunghezza
col	Numero di colonne a profondità multipla per ciascun lato del corridoio
$cost_{beam}$	Costo totale dei correnti
$cost_{build}$	Costo totale dell'edificio
$cost_{crane}$	Costo totale dei trasloelevatori
$cost_{frame}$	Costo totale delle spalle
$cost_{fund}$	Costo delle fondamenta
$cost_{guide}$	Costo totale del sistema di guida dei trasloelevatori
$cost_{heav}$	Costo del sistema di riscaldamento anti-gelo del pavimento
$cost_{insul}$	Costo totale per l'isolamento delle superfici dell'edificio
$cost_{land}$	Costo totale del terreno
$cost_{rack}$	Costo totale della scaffalatura
$cost_{refr}$	Costo totale dell'impianto di refrigerazione
$cost_{sat}$	Costo totale dei moduli satellite
$cost_{satguide}$	Costo totale del sistema di corsa del satellite
$cost_{upframe}$	Costo della soletta di chiusura scaffalatura
$crane_en_{i,j,k}$	Energia trasloelevatore per la locazione $[i,j]$ della classe di scaffalature k
$crane_t_{i,j,k}$	Tempo trasloelevatore per la locazione $[i,j]$ della classe di scaffalature k
$depth$	Numero di u.d.c. stoccabili in profondità per corsia per ciascun livello
en_cycle_{sat}	Energia media di ciclo del satellite
en_cycle_{crane}	Energia media di ciclo del trasloelevatore
$energy_{light}$	Fabbisogno energetico per l'illuminazione
$energy_{move}$	Fabbisogno energetico di movimentazione (traslo + satellite)
$energy_{refr}$	Fabbisogno energetico per refrigerazione
$frame_{lane}$	Numero di spalle per corsia
$height_{cell}$	Altezza della cella refrigerata
$height_{slab}$	Altezza dello slab di cemento armato
$intload$	Carico frigorifero interno
$length_{lane}$	Lunghezza di una corsia
$levels$	Numero di livelli della scaffalatura
$Q_{maxframe}$	Capacità massima portante dei correnti
$rack_i$	Variabile booleana per la selezione della configurazione i
t_cycle_{crane}	Tempo di ciclo medio del trasloelevatore
t_cycle_{sat}	Tempo di ciclo medio del satellite
$trload_i$	Carico frigorifero di trasmissione per il periodo i
$weight_{frame}$	Peso delle spalle per unità di lunghezza
$weight_{satguide}$	Peso totale per livello della guida satellite
$width_{lane}$	Larghezza della corsia
$ycost_{energy}$	Costi annui di energia
$ycost_{maint}$	Costi annui di manutenzione

Tabella 7.8. Parametri del modello; i valori sono relativi al caso di riferimento.

Simbolo	Descrizione	Valore
A	Superficie delle porte [m ²]	7,2
ann _{build}	Annuity factor dell'edificio (i.r. 5%, 20 anni)	0,0802
ann _{crane}	Annuity factor del trasloelevatore (i.r. 5%, 10 anni)	0,1295
ann _{guide}	Annuity factor del sistema di guida traslo (i.r. 5%, 20 anni)	0,0802
ann _{land}	Annuity factor del terreno (i.r. 5%, 20 anni)	0,0802
ann _{rack}	Annuity factor della scaffalatura (i.r. 5%, 20 anni)	0,0802
ann _{refr}	Annuity factor dell'impianto di refrigerazione (i.r. 5%, 10 anni)	0,1295
ann _{sat}	Annuity factor del satellite (i.r. 5%, 10 anni)	0,1295
aux	Coefficiente di consumo per gli impianti ausiliari	1,13
c _{beam}	Costo dei correnti [€/pezzo]	22,00
c _{en}	Costo dell'energia lettrica [€/kWh]	0,11
c _{floor}	Costo del pavimento isolato [€/m ²]	30,00
c _{guide}	Costo guida traslo [€/m]	64,50
c _{heav}	Costo del sistema di riscaldamento a pavimento anti-gelo [€/m ²]	40,00
c _{land}	Costo del terreno [€/m ²]	80,00
c _{maint}	Costo di manutenzione come percentuale costo investimento	2%
c _{maint_fr}	Costo annuo di manutenzione scaffalatura [€/frame]	10,00
COP	Coefficient of Performance per il ciclo a compressione di ammoniaca a -23 °C	2,20
c _{refr}	Costo dell'impianto di refrigerazione [€/m ³]	35,00
c _{roof}	Costo della copertura edificio isolata [€/m ²]	45,00
c _{sat}	Costo del satellite [€/modulo]	25000,00
c _{satguide}	Costo della coppia di guide satellite [€/m]	24,00
c _{slab}	Costo dello slab di cemento armato [€/m ³]	250,00
c _{steel}	Costo dell'acciaio [€/kg]	1,60
c _{upframe}	Costo soletta di chiusura [€/m ²]	25,00
c _{wall}	Costo dei muri perimetrali isolati [€/m ²]	34,72
D _f	Fattore di flusso attraverso le porte	0,7
dh _{slab}	Coefficiente di incremento altezza dello slab	0,1
D _t	Tempo apertura porte: 9 s per transito carrello per 45 transazioni/ora	0,1125
e _{air}	Spazio aggiuntivo per la circolazione dell'aria in orizzontale [m]	2,0
e _{airV}	Spazio aggiuntivo per la circolazione dell'aria in verticale [m]	2,5
e _{dock}	Spazio fuori corridoio per interfaccia banchina [m]	5,50
e _{floor}	Altezza dal suolo del primo livello di stoccaggio [m]	1,00
e _{lane}	Lunghezza aggiuntiva della corsia per posizionamento satellite [m]	0,25
E _f	Fattore di efficacia del dispositivo anti-apertura porte	0
eff _{ASRS}	Fattore di utilizzo e disponibilità di sistema	0,85
eff _{fan}	Efficienza motore ventilatori	0,9
eff _{truck}	Efficienza motore carrello banchina	0,9
en _{cycleforks}	Energia per ciclo forche trasloelevatore [kJ]	2,0
eoq	Massimo comun divisore lotti di rifornimento	16
extraguide	Lunghezza della guida fuori corridoio [m]	5,0
F _m	Fattore di densità = $[2/(1 + (\rho^r/\rho^i)^{1/3})]^{1,5}$	0,97
h	Altezza della locazione [m]	2,0
H	Altezza delle porte [m]	3,0
h _{celslab}	Altezza della cella relativa a h _{minslab} [m]	15,0
h _{in}	Entalpia dell'aria in ingresso (7 °C r.h.55%) [kJ/kg]	15,59
h _r	Entalpia dell'aria in cella (-23 °C r.h.55%) [kJ/kg]	-22,50

Tabella 7.9. Parametri del modello - continuazione

Simbolo	Descrizione	Valore
$h_{min_{slab}}$	Altezza minima dello slab [m]	1,0
hr_{year}	Ore operative annue	8400
l	Profondità della locazione [m]	0,85
$light$	Livello di illuminazione [W/m^2]	5,0
max_{col}	Massimo numero di colonne della scaffalatura	60
max_{lev}	Massimo numero di livelli della scaffalatura	15
n_{door}	Numero di porte	2
n_{fan}	Numero di ventilatori nella cella	15
n_{sat}	Coefficiente di incremento numero satelliti	1,5
n_{ul}	Numero di u.d.c. per livello sopportabili da una spalla	3
$overS$	Coefficiente di sovradimensionamento capacità di stoccaggio	1,05
$Pace$	Throughput di sistema [u.d.c./ora]	45
$power_{fan}$	Potenza nominale ventilatori [kW]	1,56
$power_{sat}$	Potenza media del satellite [kW]	0,60
$power_{truck}$	Potenza nominale del carrello interfaccia banchina [kW]	4,2
R_{floor}	Resistenza termica pavimento [$m^2 K/W$]	5.550
R_{roof}	Resistenza termica tetto [$m^2 K/W$]	8.696
R_{wall}	Resistenza termica pareti [$m^2 K/W$]	6.370
ρ_{in}	Densità aria in ingresso (7 °C r.h. 55%) [kg/m^3]	1,25
ρ_r	Densità aria nella cella (-23 °C r.h. 55%) [kg/m^3]	1,41
s	Coefficiente di sicurezza carico frigorifero	1,10
SH_{prod}	Calore specifico del prodotto da stoccare [$kJ/(kg K)$]	1,88
s_{joint}	Coefficiente di costo per le giunture	1,15
$StorCap$	Capacità di stoccaggio richiesta [u.d.c.]	4800
t_{cycle}_{forks}	Tempo di ciclo forche del trasloelevatore [s]	3
t_{cycle}_{truck}	Tempo di ciclo del carrello banchina [s]	20
T_{cell}	Temperatura di conservazione in cella [°C]	-23
T_{dock}	Temperatura della banchina [°C]	7
T_{floor}	Temperatura terreno [°C]	15
T_{peak}	Massima temperatura esterna [°C]	34,5
T_{prod}	Temperatura di ingresso prodotti [°C]	-15
T_{sun}	Incremento temperatura tetto per effetto insolazione [°C]	6
$T_{f_{sat}}$	Tempi fissi di ciclo del satellite [s]	22
w	Larghezza della locazione [m]	1,4
$weight_{beam}$	Peso dei correnti [kg/pezzo]	11
$weight_{prod}$	Peso u.d.c. [kg]	600
$weight_{sat}$	Peso del satellite [kg/modulo]	360
$weight_{satguide}$	Peso delle guide satellite per unità di lunghezza [kg/m]	15
$width_{aisle}$	Larghezza corridoio [m]	1,5

Capitolo 8

Conclusioni

Oggi giorno le aziende operanti nel mercato, sia esso business to business (B2B) o business to consumer (B2C), si devono confrontare con la crescente competitività dei concorrenti, la continua ricerca di una riduzione dei costi, oltre che la sempre più spinta variabilità e dinamicità della domanda commerciale. Ciò si traduce inevitabilmente in una crescente complessità dei flussi di materiali che interessano gli impianti produttivi e distributivi. In questo contesto un ruolo sempre più importante è ricoperto dal magazzino automatizzato. In particolare gli Automated Storage and Retrieval Systems (AS/RS) rivestono una significativa importanza, in quanto tali sistemi permettono di effettuare consegne complete, veloci e puntuali, permettono di ridurre i costi della manodopera, abbassando il bisogno di forza lavoro ed incrementano la sicurezza sul posto di lavoro, evitando al personale di operare in condizioni difficili (come ad esempio gli operatori negli ambienti di stoccaggio a freddo degli alimenti).

In un ottica di *quick response* e di orientamento alla *customer satisfaction* gli AS/RS risultano essere una notevole risorsa per la competitività aziendale; tuttavia, il continuo aumento dei costi energetici e il ruolo significativo ricoperto dalla generazione di energia nella produzione di gas serra clima-alteranti ha ultimamente posto l'efficienza energetica al centro dell'attenzione, ponendo l'*Energy efficient manufacturing* e conseguentemente l'*Energy-aware production planning and control* come obiettivo primario da perseguire. Un utilizzo più efficiente delle risorse energetiche comporta ripercussioni sulle prestazioni logistiche e sui criteri progettuali tradizionalmente utilizzati per sviluppare strutture e strategie appropriate per le supply chain.

Nonostante gli AS/RS siano stati riconosciuti "*to make a play for sustainability*" in quanto, permettendo un migliore utilizzo dello spazio e contenendo i consumi di energia per il riscaldamento, il raffreddamento, l'illuminazione e la ventilazione, riducono le emissioni di gas serra clima-alteranti, essi richiedono energia per gli spostamenti del trasloelevatore e questo aspetto

è stato del tutto trascurato nei processi di ottimizzazione di tali strutture. Alla luce di ciò, nella presente tesi si sono riviste sia le politiche di controllo che la progettazione fisica dei magazzini AS/RS, spostando il focus dal tradizionale orientamento alla minimizzazione del picking time, direttamente collegato al servizio percepito dal cliente, ad un'ottica sostenibile, perseguendo l'obiettivo di una maggiore efficienza energetica, in grado di influenzare positivamente le prestazioni sia economiche sia ambientali.

A tal fine è stato necessario sviluppare un modello dettagliato per la valutazione del tempo e dell'energia per la movimentazione del trasloelevatore. Il modello considera l'utilizzo di trasloelevatori di nuova generazione, i quali possiedono dei sistemi di controllo che permettono, variando i profili di velocità, non solo il simultaneo movimento lungo l'asse orizzontale e verticale, ma anche l'arrivo contemporaneo alla locazione di prelievo/stoccaggio. Il modello considera un moto uniformemente accelerato e offre la possibilità di introdurre il recupero energetico nella fase di frenata del trasloelevatore.

Attraverso questo modello è stato possibile indagare le politiche di controllo dell'AS/RS, considerando la minimizzazione del consumo energetico quale obiettivo primario di ottimizzazione, senza però trascurare l'analisi delle prestazioni di tempo, dato il loro importante legame con il servizio percepito dal cliente.

In particolare, per le politiche di storage assignment si è introdotta una nuova politica dedicata chiamata *Energy-based Full Turnover Policy* (EBFT) e definita come la strategia di stoccaggio che assegna ai prodotti ordinati in base al loro turnover in senso decrescente le locazioni che richiedono il minor consumo energetico per essere servite. Dal confronto con la tradizionale *Time based Full Turnover Policy* (TBFT), la quale assegna ai prodotti a più alta rotazione le posizioni che richiedono minor tempo di accesso, è emerso che la forma delle zone dedicate ai prodotti si modifica passando dalla tradizionale forma rettangolare o L-shaped, propria dell'allocazione TBFT, ad una forma a gradini per l'allocazione EBFT basata sull'energia. Dall'analisi condotta si è appurato che l'allocazione dei prodotti energy-based full turnover risulta essere, dal punto di vista energetico, migliore rispetto alle comuni politiche random (con significativi vantaggi dell'ordine del 14%-19%), per classi e time-based full turnover.

Indagando sui diversi fattori che influenzano le prestazioni si è riscontrato che la geometria della scaffalatura non influisce in modo determinante sulle prestazioni energetiche del sistema, in quanto, le minori performance di velocità e accelerazione di traslazione, i minori percorsi orizzontali e il maggior sfruttamento dell'effetto positivo della gravità in fase di discesa (consumo energetico nullo in assenza di apparecchi di recupero), propri della scaffalatura maggiormente sviluppata in verticale, compensano i maggiori consumi energetici necessari per movimentare i carichi a livelli più alti. La geometria della scaffalatura acquisisce importanza qualora i trasloelevatori siano dotati di un sistema di recupero energetico che permette di reinmettere

in rete parte dell'energia altrimenti dissipata in calore nella fase di frenata del trasloelevatore. In questo caso i risultati dimostrano come un maggior sviluppo verticale dell'AS/RS consenta di sfruttare la maggior energia potenziale associata alle celle, consentendo un maggior quantitativo di energia recuperabile nella fase di discesa; inoltre, tali vantaggi energetici vengono ulteriormente accentuati per carichi pesanti grazie al maggior contributo della forza peso.

Alla luce dei recentissimi risultati della letteratura sulle politiche dinamiche di stoccaggio, che si sono dimostrate essere le best performer per l'ottimizzazione del picking time qualora vi siano più locazioni assegnate ad un determinato codice prodotto, surclassando le tradizionali politiche dedicate nel tentativo di migliorare sia la flessibilità sia il risparmio energetico si è studiata una strategia di allocazione energy-based di tipo dinamico, denominata *best energy open location strategy* e si è riscontrato come i risultati ottenuti dalla politica proposta rispecchino, dal punto di vista energetico, i risultati ottenuti di recente in letteratura dal punto di vista temporale, si è riscontrato, infatti, un miglioramento delle prestazioni energetiche compreso tra il 38% al 60% rispetto all'allocazione EBFT.

Valutando le politiche di allocazione in ottica energy-based, nascono nuove opportunità qualora debbano essere gestiti prodotti con differenti pesi all'interno della stessa scaffalatura (il peso è sempre stato trascurato nella tradizionale prospettiva volta all'ottimizzazione temporale, in quanto non influenza il tempo di ciclo, mentre dal punto di vista energetico è facilmente intuibile l'influenza del peso dei prodotti sul consumo energetico). Si è così introdotta una nuova politica chiamata *stratificata*, che consiste nello stratificare la scaffalatura in tante fasce orizzontali quante le classi di peso dei prodotti, vincolando gli elementi più pesanti ad occupare gli strati più bassi, dedicando via via in ordine decrescente dal basso verso l'alto i livelli più alti agli elementi leggeri. Tale politica consente la diminuzione della sezione trasversale degli elementi portanti della scaffalatura, riducendo così i costi di investimento, oltre a benefici per la sicurezza anti-sismica e minor emissioni di CO_2 . Si tratta di un'opportunità molto interessante, che richiede la definizione di adeguate politiche di controllo, che rendano questa opzione progettuale effettivamente praticabile.

Si può dunque concludere che le politiche di stoccaggio di tipo energy-based possano considerarsi degli strumenti efficaci per perseguire una *sustainable logistics*, essendo in grado di incidere sia sulla dimensione ambientale, grazie ad una riduzione di emissioni GHG per la fornitura di energia elettrica, sia su quella economica della sostenibilità di un AS/RS.

Un'ulteriore oggetto di analisi è stato costituito dalle politiche di dwell point, con l'obiettivo di identificare la locazione dove il trasloelevatore deve attendere le future richieste, al fine di minimizzare i tempi o i consumi energetici dei successivi cicli di prelievo. Dalle simulazioni è emerso che, se dal punto di vista temporale si possono ottenere dei vantaggi dall'anticipare

il movimento del trasloelevatore dato che tale spostamento risulta essere *no time sensitive* per il cliente, dal punto di vista energetico ogni spostamento comporta comunque un consumo di energia. Pertanto, quando l'efficienza energetica rappresenta l'obiettivo principale da perseguire, il trasloelevatore deve attendere le future richieste alla stazione di I/O; in caso contrario, posizionare il trasloelevatore nel baricentro temporale della scaffalatura rappresenta il modo ottimale per migliorare il servizio offerto al cliente.

L'ultima politica di controllo su cui si è posta l'attenzione è il sequencing, dato che gli obiettivi di efficienza energetica nei magazzini AS/RS possono essere perseguiti ottimizzando le combinazioni di stoccaggi e prelievi che deve compiere il trasloelevatore in modo da minimizzare il consumo energetico per la movimentazione. Viene proposto un modello di ottimizzazione, basato sul Constraint Programming ibridato con la Large Neighborhood Search, che permette di risolvere il problema NP-hard di sequenziamento dei cicli doppi di un AS/RS (stoccaggio più prelievo in un unico ciclo) nella sua formulazione più generale e complessa. Le ottime prestazioni in termini di tempi computazionali e la minima distanza dalla soluzione ottima, rendono il modello uno strumento efficace per combinare le richieste di stoccaggio e prelievo al fine di minimizzare il tempo o l'energia. Anche adottando un'ottimizzazione time-based dei cicli, l'energia si riduce drasticamente in confronto all'utilizzo di cicli single command (circa del 20%). Qualora però il consumo di energia rappresenti l'obiettivo primario al fine di ridurre i costi di approvvigionamento energetico e promuovere una immagine "verde" dell'azienda, allora le migliori prestazioni possibili si ottengono combinando una politica di allocazione dinamica energy-based con un'ottimizzazione energy-based del sequenziamento dei cicli dual command.

Dall'analisi delle politiche di controllo è emerso che una loro ottimizzazione dal punto di vista temporale comporta significativi miglioramenti anche dal punto di vista energetico, dato lo stretto legame tra tempo ed energia; esistono, tuttavia, dei margini di miglioramento che comportano dei trade-off tra le due prestazioni, trovandosi dunque di fronte alla possibilità di ottenere dei benefici energetici a discapito del servizio offerto al cliente o viceversa. Una possibile soluzione da considerare è quella di adottare degli approcci ibridi al fine di migliorare il servizio al cliente e mantenere al contempo consumi energetici ridotti; una possibile soluzione è quella di adottare cicli dual command con una politica di allocazione energy-based, al fine di ottimizzare dal punto di vista energetico i viaggi a carico da e per la stazione di I/O, e un sequenziamento time-based, al fine di ottimizzare il tempo di interleaving di ogni ciclo dual command, così da migliorare la risposta al cliente.

Per quanto concerne la progettazione, si è proposto un nuovo strumento di supporto decisionale alla progettazione degli automated storage and retrieval systems. Con l'obiettivo di promuovere soluzioni sostenibili, vengono prese in considerazione, attraverso due modelli separati, la prospettiva economica e quella ambientale, da utilizzarsi congiuntamente per identificare i

possibili compromessi o convergenze tra i differenti obiettivi degli stakeholders coinvolti. Al fine di ridurre il gap tra la pratica professionale, la disponibilità dei componenti sul mercato e i modelli matematici di progettazione esistenti, il modello proposto si basa su una descrizione realistica della struttura della scaffalatura, in termini di configurazioni delle baie e opportuno dimensionamento dei componenti della scaffalatura. Inoltre si è considerato, per la prima volta nei modelli di progettazione degli AS/RS, il consumo di energia per i movimenti del trasloelevatore come costo operativo, con il relativo impatto sui costi totali, ma soprattutto sulle emissioni di anidride carbonica. Nel caso studio proposto il risultato ottimale del modello di costo coincide essenzialmente con la configurazione atta a minimizzare l'impatto ambientale, rafforzando l'idea che sia effettivamente possibile, con opportuni strumenti di ottimizzazione, identificare soluzioni logistiche sostenibili, capaci di conquistare sia vantaggi ambientali sia economici. Dallo studio è emerso che l'elevato impatto sui costi della scaffalatura relativo ai montanti fa preferire dal punto di vista economico AS/RS a maggior sviluppo orizzontale, i quali adottano trasloelevatori più economici e consentono di avere minori costi relativi alle fondamenta rispetto a sistemi maggiormente sviluppati in altezza. Viene inoltre preferita, sia dal punto di vista ambientale che economico, un'allocazione stratificata che consente, nel caso si debbano gestire pesi multipli nella medesima scaffalatura, di diminuire le sezioni trasversali degli elementi della scaffalatura spostandosi dal pavimento al soffitto, riducendo così i costi di investimento e, grazie all'utilizzo inferiore di acciaio, anche le emissioni di anidride carbonica. Per la modellizzazione e risoluzione del problema si è adottata la metodologia del Constraint Programming utile per gestire la non linearità delle variabili e della funzione obiettivo.

Poiché gli automated storage and retrieval systems si stanno imponendo come tipologia preferenziale per l'immagazzinamento di alimenti surgelati, è emersa la necessità di ottimizzarne la configurazione in questo particolare contesto. Si è proposto un modello di ottimizzazione della configurazione di un Refrigerated Automated Storage and Retrieval System (R-AS/RS) che considera l'energia richiesta dal sistema sia per la movimentazione sia per la refrigerazione. Per promuovere delle soluzioni di stoccaggio sostenibili, non viene considerato come dato l'edificio in cui accomodare l'R-AS/RS, ma si è immaginato di costruirlo ex-novo, ottimizzando così congiuntamente anche le superfici esterne della struttura e i volumi risultanti, che vengono quindi considerati come variabili del modello e non semplicemente come vincoli. Inoltre, allo scopo di ottenere soluzioni compatte con profondità multipla delle scaffalature, come richiesto dagli R-AS/RS, è stato modellizzato il sistema di movimentazione basato su trasloelevatore e satellite con controllo remoto, non considerato prima in letteratura. Nel caso esaminato la configurazione ottimale è rappresentata da una scaffalatura compatta, corrispondente alla massima profondità ammissibile per la selettività unitaria e ad uno sviluppo verticale limitato, giacché maggiori altezze implicherebbero un incremento

del costo delle spalle in virtù dei maggiori carichi da sopportare. L'applicazione ad un caso di riferimento ha consentito di testare le potenzialità del modello come strumento di supporto alle decisioni; esso si è dimostrato in grado di gestire diversi valori della capacità di stoccaggio e del fattore di utilizzo e disponibilità del sistema, nonché specifiche richieste dell'utente. Si è dimostrato altresì efficace nel valutare l'impatto delle decisioni di supply chain come la temperatura di conservazione dei prodotti, in modo tale che si possa considerare opportunamente non solo la qualità del prodotto, ma anche il fabbisogno energetico e i costi del processo di stoccaggio, favorendo la nascita di supply chain sostenibili. L'introduzione dei cataloghi dei fornitori per guidare la selezione dei componenti del sistema ha consentito di ridurre il gap tra i modelli teorici e la prassi progettuale, aumentando la fattibilità delle soluzioni individuate e rendendo di fatto lo strumento proposto effettivamente adottabile per la progettazione di un R-AS/RS.

L'introduzione dell'ottica energy-based nella configurazione e gestione dei magazzini automatizzati ha aperto dunque nuove prospettive di ricerca e permesso l'individuazione di strategie e strumenti di ottimizzazione in grado di spingere verso soluzioni logistiche sostenibili. Un simile sforzo potrà essere rivolto in futuro anche ad altre tipologie d'impianto di stoccaggio, così da contribuire al raggiungimento di quel sustainable supply chain management tanto auspicato sia dall'ambiente accademico sia da quello istituzionale e imprenditoriale.

Bibliografia

- Ahi, P. and Searcy, C. (2013). A comparative literature analysis of definitions for green and sustainable supply chain management. *Journal of Cleaner Production*, 52:329–341. doi: 10.1016/j.jclepro.2013.02.018.
- Ashayeri, J., Gelders, L., and Van Wassenhove, L. (1985). A microcomputer-based optimisation model for the design of automated warehouses. *International Journal of Production Research*, 23(4):826–839.
- Ashby, A., Leat, M., and Hudson-Smith, M. (2012). Making connections: a review of supply chain management and sustainability literature. *Supply Chain Management: An International Journal*, 17(5):497–516.
- Backlund, S., Thollander, P., Palm, J., and Ottosson, M. (2012). Extending the energy efficiency gap. *Energy Policy*, 51:392–396.
- Baker, P. and Canessa, M. (2007). Warehouse design: A structured approach. *European Journal of Operational Research*, 193:425–436.
- Banaszak, Z., Zaremba, M., and Muszynski, W. (2009). Constraint programming for project-driven manufacturing. *International Journal of Production Economics*, 120(2):463 – 475.
- Bozer, Y., Schorn, E., and Sharp, G. (1990). Geometric approaches to solve the chebyshev traveling salesman problem. *IIE Transactions*, 22(3):238–254.
- Bozer, Y. and White, J. (1984). Travel-Time Models for Automated Storage/Retrieval Systems. *IIE Transactions*, 16(4):329–338.
- Bozer, Y. and White, J. (1990). Design and performance models for end-of-aisle order picking systems. *Management Science*, 36(7):852–866.
- Cagno, E. and Trianni, A. (2013). Exploring drivers for energy efficiency within small- and medium-sized enterprises: First evidences from italian manufacturing enterprises. *Applied Energy*, 104:276–285.

- Caputo, A. (2012). Italian energy supply emission factors. Report 172, ISPRA-Istituto Superiore Protezione e Ricerca Ambientale. In Italian, available at http://www.isprambiente.gov.it/files/pubblicazioni/rapporti/rapporto_172_2012.pdf.
- Carter, C. and Easton, P. (2011). Sustainable supply chain management: evolution and future directions. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 41(1):46–62.
- Chen, L., Langevin, A., and Riopel, D. (2010). The storage location assignment and interleaving problem in an automated storage/retrieval system with shared storage. *International Journal of Production Research*, 48(4):991–1011.
- Compagno, L., D’Urso, D., and Trapani, N. (2013). Designing an optimal shape warehouse. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, 398(PART 2):248–255. cited By (since 1996)0.
- de Koster, R., Le-Duc, T., and Roodbergen, K. (2007). Design and control of warehouse order picking: A literature review. *European Journal of Operational Research*, 182:481–501.
- de Koster, R., Le-Duc, T., and Yugang, Y. (2008). Optimal storage rack design for a 3-dimensional compact AS/RS. *International Journal of Production Research*, 46(6):1495–1514.
- Egbelu, P. (1991). Framework for dynamic positioning of storage/retrieval machines in an automated storage/retrieval system. *Int. J. Production Research*, 29(1):17–37.
- Egbelu, P. and Wu, C. (1993). A comparison of dwell point rules in an automated storage/retrieval system. *Int. J. Production Research*, 31(11):2515–2530.
- Ekren, B., Heragu, S., Krishnamurthy, A., and Malmberg, C. (2010). Simulation based experimental design to identify factors affecting performance of avrs/rs. *Computers & Industrial Engineering*, 58:175–185.
- Eldemir, F., Graves, R., and Malmberg, C. (2004). New cycle time and space estimation models for automated storage and retrieval system conceptualization. *International Journal of Production Research*, 42(22):4767–4783.
- Elkington, J. (1998). *Cannibals with Forks: The Triple Bottom Line of the 21st Century*. New Society Publishers, Stoney Creek, CT.
- EU (2012). Directive 2012/27/eu on energy efficiency. Technical report, EU, available at http://ec.europa.eu/energy/efficiency/eed/eed_en.htm.

- Eynan, A. and Rosenblatt, M. (1993). An interleaving policy in automated storage/retrieval systems. *International Journal of Production Research*, 31(1):1–18.
- Eynan, A. and Rosenblatt, M. (1994). Establishing zones in single-command class-based rectangular as/rs. *IIE Transactions*, 26(1):38–46.
- Gagliardi, J.-P., Renaud, J., and Ruiz, A. (2012a). Models for automated storage and retrieval systems: a literature review. *International Journal of Production Research*, 50(24):7110–7125.
- Gagliardi, J.-P., Renaud, J., and Ruiz, A. (2012b). On storage assignment policies for unit-load automated storage and retrieval systems. *International Journal of Production Research*, 50(3):879–892.
- Gagliardi, J.-P., Renaud, J., and Ruiz, A. (2013). On sequencing policies for unit-load automated storage and retrieval systems. *International Journal of Production Research*. , DOI: 10.1080/00207543.2013.838331.
- Garetti, M. and Taisch, M. (2012). Sustainable manufacturing: trends and research challenges. *Production Planning & Control*, 23(2-3):83–104.
- Goetschalckx, M. and Ratliff, H. (1990). Shared storage policies based on the duration stay of unit loads. *Management science*, 36(9):1120–1132.
- Graves, S., Hausman, W., and Schwarz, L. (1977). Storage-retrieval interleaving in automatic warehousing systems. *Management Science*, 23(9):935–945.
- Gu, J., Goetschalckx, M., and McGinnis, L. (2007). Research on warehouse operation: A comprehensive review: A comprehensive review. *European Journal of Operational Research*, 177:1–21.
- Gu, J., Goetschalckx, M., and McGinnis, L. (2010). Research on warehouse design and performance evaluation: A comprehensive review. *European Journal of Operational Research*, 203:539–549.
- Hachemi, K., Sari, Z., and Ghouali, N. (2012). A step-by-step dual cycle sequencing method for unit-load automated storage and retrieval systems. *Computers & Industrial Engineering*, 63:980–984.
- Halldórsson, Árni. and Kovács, G. (2010). The sustainable agenda and energy efficiency: Logistics solutions and supply chains in times of climate change. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 40(1/2):5–13.
- Han, M., McGinnis, L., Shieh, J., and White, J. (1987). On sequencing retrievals in an automated storage/retrieval system. *IIE Transactions*, 19(1):56–66.

- Hassini, E., Surti, C., and Searcy, C. (2012). A literature review and a case study of sustainable supply chains with a focus on metrics. *International Journal of Production Economics*, 140:69–82.
- Hausman, W., Schwarz, L., and Graves, S. (1976). Optimal storage assignment in automatic warehousing systems. *Management Science*, 22(6):629–638.
- Hwang, H., Chang, I., Moon, S., and Lim, J. (1999). Economic Design of Refrigerated Automated Storage and Retrieval Systems. *Engineering Optimisation*, 32:249–266.
- Hwang, H. and Lee, S. (1990). Travel-time models considering the operating characteristics of the storage and retrieval machine. *International Journal of Production Research*, 28(10):1779–1789.
- Hwang, H. and Lim, J. (1993). Deriving an optimal dwell point of the storage/retrieval machine in an automated storage/retrieval system. *Int. J. Production Research*, 31(11):2591–2602.
- Italian Regulatory Authority for Electricity and Gas (2011). Energy prices data. Technical report. available at: <http://www.autorita.energia.it/it/prezzi.htm>.
- James, S. and James, C. (2010). The food cold-chain and climate change. *Food Research International*, 43:1944–1956.
- James, S., Swain, M., Brown, T., Evans, J., Tassou, S., Ge, Y., Eames, I., Missenden, J., Maidment, G., and Baglee, D. (2009). Improving the energy efficiency of food refrigeration operations. Technical report, The Institute of Refrigeration.
- John J. Bartholdi, I. and Hackman, S. (2011). *Warehouse & Distribution Science*. Georgia Institute of Technology, release 0.94 edition. available at <http://www.warehouse-science.com>.
- Karasawa, Y., Nakayama, H., and Dohi, S. (1980). Trade-off analysis for optimal design of automated warehouses. *International Journal of Systems Science*, 11(5):567–576.
- Kulturel, S., Ozdemirel, N., Sepil, C., and Bozkurt, Z. (1999). Experimental investigation of shared storage assignment policies in automated storage/retrieval systems. *IIE Transactions*, 31(8):739–749.
- Lee, H. and Schaefer, S. (1996). Retrieval sequencing for unit-load automated storage and retrieval systems with multiple openings. *International Journal of Production Research*, 34(10):2943–2962.

- Lee, H. and Schaefer, S. (1997). Sequencing methods for automated storage and retrieval systems with dedicated storage. *Computers & Industrial Engineering*, 32(2):351–362.
- Lee, Y., Lee, M., and Hur, S. (2005). Optimal design of rack structure with modular cell in as/rs. *International Journal of Production Economics*, 98:172–178.
- Lerher, T., Edl, M., and Rosi, B. (2013). Energy efficiency model for the mini-load automated storage and retrieval systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. , DOI 10.1007/s00170-013-5253-x.
- Lerher, T. and Potrč, I. (2006). The design and optimization of automated storage and retrieval systems. *Journal of Mechanical Engineering*, 52(5):268–291.
- Malmborg, C. (2001). Rule of thumb heuristics for configuring storage racks in automated storage and retrieval systems design. *International Journal of Production Research*, 39(3):511–527.
- Malmborg, C. (2002). Conceptualizing tools for autonomous vehicle storage and retrieval systems. *International Journal of Production Research*, 40(8):1807–1822.
- Meller, R. and Mungwattana, A. (2005). As/rs dwell-point strategy selection at high system utilization: a simulation study to investigate the magnitude of the benefit. *Int. J. Production Research*, 43(24):5217–5227.
- Meneghetti, A. and Monti, L. (2011a). Energy-based optimization of dwell point location in automated storage and retrieval systems. In Kuljanich, E., editor, *Proceedings of AMST 2011 Advanced Manufacturing Systems and Technology Conference*, pages 485–93.
- Meneghetti, A. and Monti, L. (2011b). Energy efficient dual command cycles in automated storage and retrieval systems. In Moshfegh, B., editor, *Proceedings of the World Renewable Energy Congress, May 8-13, 2011, Linköping, Sweden*, volume 7, pages 1668–1675. Linköping University Electronic Press.
- Meneghetti, A. and Monti, L. (2013a). *Advances in Production Management Systems Competitive Manufacturing for Innovative Products and Services*, volume 397 of *IFIP AICT*, chapter How Energy Recovery Can Reshape Storage Assignment in Automated Warehouses, pages 33–40. Springer.
- Meneghetti, A. and Monti, L. (2013b). Multipleweight unit load storage assignment strategies for energy efficient automated warehou-

- ses. *International Journal of Logistics Research and Applications*. , DOI:10.1080/13675567.2013.861896.
- Meneghetti, A. and Monti, L. (2013c). Sustainable storage assignment and dwellpoint policies for automated storage and retrieval systems. *Production Planning & Control*, 24(6):511–20.
- Meneghetti, A. and Nardin, G. (2012). Enabling industrial symbiosis by a facilities management optimization approach. *Journal of Cleaner Production*, 35:263–273.
- MHIA (2009). Automated storage systems make a play for sustainability. AS/RS quarterly report, Material Handling Industry of America, <http://www.mhia.org/industrygroups/asrs/news>.
- MHIA (2011a). AS/RS: An investment in the future. AS/RS quarterly report, Material Handling Industry of America, available at <http://www.mhia.org/industrygroups/asrs/news>.
- MHIA (2011b). Sustainability in warehousing, distribution & manufacturing. Promat 2011 keynote, Material Handling Industry of America, available at http://www.mhi.org/subwebs/emails/images/MHIA_ProMatsustainabilitystudy.pdf.
- Monte, A. (2003). *Elementi di Impianti Industriali*, volume 1. Libreria Cortina Torino.
- Morton, R. (2009). As/rs the heights are getting higher. *Material Handling & Logistics*, available at <http://mhlnews.com/technology-amp-automation/asrs-heights-are-getting-higher>.
- Nielsen, C. (2008). Carbon footprint of concrete buildings seen in the life cycle perspective. In *Proceedings NRMCA 2008 Concrete Technology Forum*.
- Owen, M., editor (2010a). *The 2010 ASHRAE Handbook-Refrigeration*, chapter 23 Refrigerated-Facility Design, pages 23.1-16. ASHRAE.
- Owen, M., editor (2010b). *The 2010 ASHRAE Handbook-Refrigeration*, chapter 24 Refrigerated-Facility Loads, pages 24.1-7. ASHRAE.
- Owen, M., editor (2010c). *The 2010 ASHRAE Handbook-Refrigeration*, chapter 19 Thermal Properties of Foods, pages 19.1-31. ASHRAE.
- Owen, M., editor (2013). *2013 ASHRAE Handbook - Fundamentals*, chapter 2 Thermodynamics and Refrigeration Cycles. ASHRAE, Atlanta GA.
- Park, B. (1991). *Analytical models and optimal strategies for automated storage/retrieval system operations*. Phd thesis, Georgia Institute of Technology , Atlanta, GA.

- Park, B. (1999). Optimal dwell point policies for automated storage/retrieval systems with dedicated storage. *IIE Transactions*, 31:1011–1013.
- Peters, B., Smith, J., and Hale, T. (1996). Closed form models for determining the optimal dwell point location in automated storage and retrieval systems. *Int. J. Production Research*, 34(6):1757–1771.
- Petersen, C. and Aase, G. (2004). A comparison of picking, storage, and routing policies in manual order picking. *International Journal of Production Economics*, 92:11–19.
- Porter, M. and Kramer, M. (2006). Strategy and society: the link between competitive advantage and corporate social responsibility. *Harvard Business Review*, 84(12):78–92.
- Richman, R., Pasqualini, P., and Kirsh, A. (2009). Life-cycle analysis of roofing insulation levels for cold storage buildings. *Journal of Architectural Engineering*, 15(2):55–61.
- Rong, A., Akkerman, R., and Grunow, M. (2011). An optimization approach for managing fresh food quality throughout the supply chain. *International Journal of Production Economics*, 131(1):421–429.
- Roodbergen, K. and Vis, I. (2009). A survey of literature on automated storage and retrieval systems. *European Journal of Operational Research*, 194:343–362.
- Rosenblatt, M. J., Roll, Y., and Zyser, V. (1993). A combined optimization and simulation approach for designing automated storageretrieval systems. *IIE Transactions*, 25(1):40–50.
- Rossi, F., van Beek, P., and Walsh, T. (2006). *Handbook of Constraint Programming*. Elsevier Science Inc., New York.
- Seuring, S. (2013). A review of modeling approaches for sustainable supply chain management. *Decision Support Systems*, 54:1513–1520.
- Shaw, P. (1998). Using constraint programming and local search methods to solve vehicle routing problems. In *Proceeding of CP '98*, pages 417–31.
- Tanaka, S. and Araki, M. (2009). Routing problem under the shared storage policy for unit-load automated storage and retrieval systems with separate input and output points. *International Journal of Production Research*, 47(9):2391–2408.
- Tassou, S., Lewis, J., Ge, Y., Hadawey, A., and Chaer, I. (2010). A review of emerging technologies for food refrigeration applications. *Applied Thermal Engineering*, 30(4):263–276.

- Tompkins, J., White, J., Bozer, Y., Frazelle, E., Tanchoco, J., and J.Trevino (1996). *Facilities Planning*. Wiley, New York, 2nd edn edition.
- UN (1987). Report of the world commission on environment and development: Our common future. Technical report, UN, <http://www.undocuments.net/wcedocf.htm>.
- United Nations (1992). Agenda 21: Environment and development agenda. United nations environment programme, United Nations. available at: <http://www.unep.org/Documents.Multilingual/Default.asp?documentid=52>.
- Van den Berg, J. (2002). Analytic expressions for the optimal dwell point in an automated storage/retrieval system. *Int. J. Production Economics*, 76:13–25.
- Van den Berg, J. and Gademan, A. (1999). Optimal routing in an automated storage/retrieval system with dedicated storage. *IIE Transactions*, 31:407–415.
- Van Hentenryck, P. and Michel, L. (2005). *Constraint-Based Local Search*. MIT Press.
- Wen, U. and Chen, S. (2001). The impact of acceleration/deceleration on travel-time models in class-based automated s/r systems. *IEE Transactions*, 33(7):599–608.
- Winter, M. and Knemeyer, A. (2013). Exploring the integration of sustainability and supply chain management: Current state and opportunities for future inquiry. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 43(1):18–38.
- World Steel Association (2011). Methodology report: Life cycle inventory study for steel products. Technical report. Available at [http://www.worldsteel.org/dms/internetDocumentList/bookshop/LCA-Methodology-Report/document/LCA Methodology Report.pdf](http://www.worldsteel.org/dms/internetDocumentList/bookshop/LCA-Methodology-Report/document/LCA%20Methodology%20Report.pdf), last access: February 2013.
- Yu, Y. and de Koster, M. (2009). Designing an optimal turnover-based storage rack for a 3d compact automated storage and retrieval system. *International Journal of Production Research*, 47(6):1551–1571.
- Zaerpour, N., de Koster, R., and Yu, Y. (2013). Storage policies and optimal shape of a storage system. *International Journal of Production Research*. cited By (since 1996)0; Article in Press.
- Zanoni, S. and Zavanella, L. (2012). Chilled or frozen? decision strategies for sustainable food supply chains. *International Journal of Production Economics*, 140(2):731–736.