
ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BOLOGNA
Facoltà di Ingegneria
Corso di Laurea in Ingegneria Gestionale
Tesi di Laurea in Laboratorio di Simulazione per la Logistica LS

**Modello analitico per la progettazione
di magazzini automatizzati con
allocazione della merce per zone
dedicate e serviti da trasloelevatori
multi-shuttle**

Candidato:
Chiara Rossi

Relatore:
Chiar.mo Prof. Mauro Gamberi

Anno Accademico 2008/2009 – Sessione III

INDICE

Introduzione	4
1 Magazzini automatizzati	5
1.1 I trasloelevatori	5
1.2 Cicli semplici e cicli combinati	6
1.3 Il modello di Bozer & White	8
1.3.1 Calcolo del tempo di ciclo semplice	9
1.3.2 Calcolo del tempo di ciclo combinato	11
2 Trasloelevatori multi-shuttle	17
2.1 Cicli combinati per trasloelevatori multi-shuttle	17
2.2 Accenni ai modelli di Meller & Mungwattana	18
3 Criteri di allocazione della merce	20
3.1 Allocazione della merce per zone dedicate	20
3.2 Il modello di Eynan e Rosenblatt	21
3.2.1 Tipologie di zone	22
3.2.2 Calcolo di t_i e G_i per ogni tipologia di zona	23
3.2.3 Tempo di ciclo per magazzini organizzati con tre zone	25
4 Modello analitico per la progettazione di magazzini automatizzati con allocazione della merce per zone dedicate e serviti da trasloelevatori multi-shuttle	29
4.1 Twin-shuttle	32
4.2 Triple-shuttle	34
4.3 Calcolo di t_a , t_b , t_c , t_{aa} , t_{bb} , t_{cc} , t_{ab} , t_{ac} e t_{bc}	37
4.3.1 Configurazione I	38
4.3.2 Configurazione II	46
5 Validazione Simulativa del modello analitico	51
5.1 Modelli simulativi e AutoMod	51
5.2 Modello simulativo implementato	52
5.2.1 AS/RS system “magazzino”	52

5.2.2	Process system “simulazione”	53
5.3	Risultati delle simulazioni	87
6	Metodo esatto per il calcolo di t_{bb} , t_{cc} (nella configurazione II), t_{ab} , t_{ac} e t_{bc}	91
6.1	Calcolo di t_{bc} nella configurazione I.....	91
	Conclusioni	97
	Bibliografia	98
	Ringraziamenti	99

INTRODUZIONE

La presente tesi è finalizzata alla presentazione di un modello analitico per la progettazione di magazzini automatizzati gestiti con allocazione a zone dedicate e serviti da trasloelevatori multi-shuttle. Tale modello è stato sviluppato a partire da tre modelli analitici preesistenti, ognuno dei quali si concentra solo su alcuni degli aspetti considerati: magazzini automatizzati, allocazione a zone, utilizzo di trasloelevatori multi-shuttle e cicli combinati modificati.

Nel capitolo 1 sono presentate le caratteristiche che distinguono i magazzini automatizzati e il modello di Bozer & White per il calcolo dei tempi di ciclo semplici e combinati.

Il capitolo 2 introduce i trasloelevatori multi-shuttle e il loro impatto sulle tipologie di cicli realizzabili, vengono inoltre fatti alcuni accenni al modello di Meller & Mungwattana per il calcolo dei tempi di ciclo in magazzini automatizzati serviti da trasloelevatori multi-shuttle.

Nel capitolo 3 è esposto il criterio di allocazione della merce per zone dedicate e ed è presentato il modello di Eynan & Rosenblatt per il calcolo del tempo di ciclo semplice in magazzini automatizzati con allocazione della merce per zone dedicate.

Nel capitolo 4 è esposto il modello analitico sviluppato con l'approssimazione data dall'utilizzo delle distanze euclidee.

Il capitolo 5 contiene una dettagliata descrizione del modello simulativo creato allo scopo di validare il modello analitico, le simulazioni effettuate e il loro confronto con i dati forniti dal modello analitico.

Infine, il capitolo 6 illustra, principalmente tramite un esempio di applicazione, il metodo esatto per la valutazione dei tempi che nel capitolo 4 sono stati approssimati con le distanze euclidee.

1 MAGAZZINI AUTOMATIZZATI

I magazzini automatizzati rappresentano l'evoluzione di quelli tradizionali in un'ottica di automazione del processo di produzione e quindi di integrazione con linee produttive a elevato grado di automazione.

Un magazzino automatizzato è formato da corridoi su ognuno dei quali affacciano due scaffalature; ogni corridoio è servito da uno e un solo trasloelevatore (Figura 1.1).

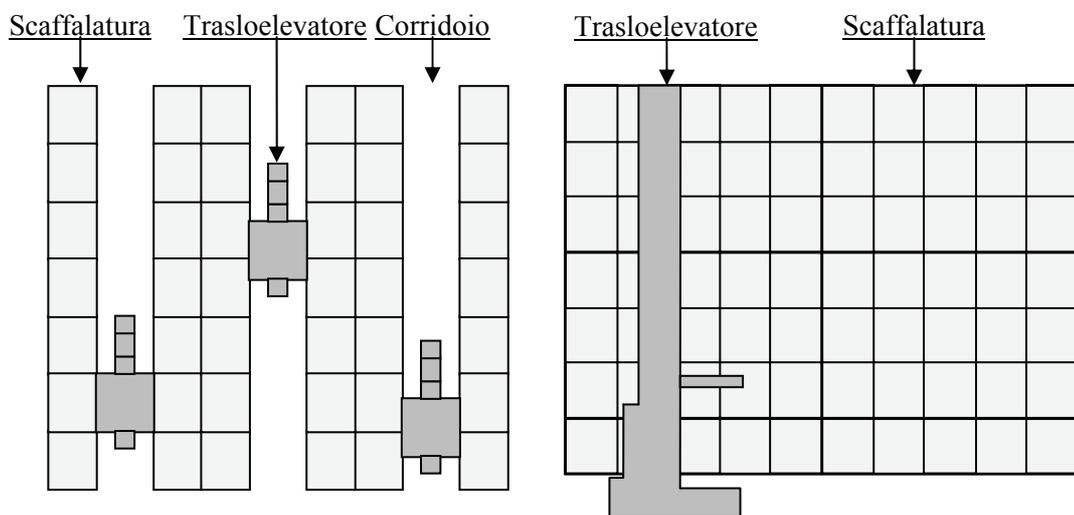


Figura 1.1

1.1 I trasloelevatori

Un trasloelevatore è una macchina per il prelievo e il deposito che non necessita di operatori a bordo caratterizzata dalla possibilità di muoversi simultaneamente lungo la direzione orizzontale e verticale. Un trasloelevatore (Figura 1.2) è essenzialmente costituito da un telaio mobile scorrevole lungo una colonna verticale la quale può traslare lungo il

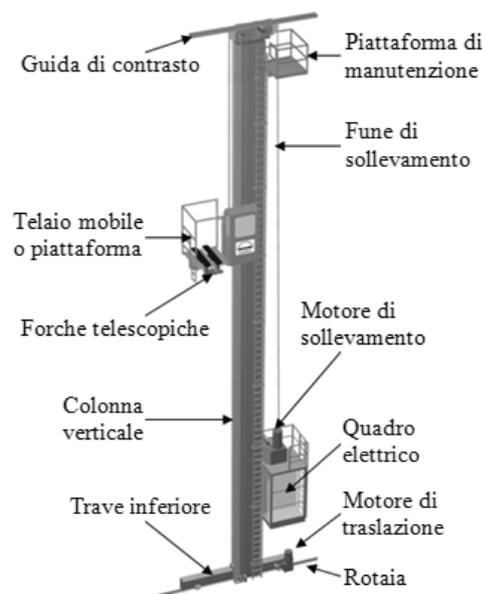


Figura 1.2

corridoio essendo fissata a una trave inferiore poggiante su ruote che scorrono su una rotaia ancorata al pavimento. Il telaio mobile, o piattaforma, è dotato, nel caso più semplice, di una coppia di forche retrattili (trasloelevatore single-shuttle) per il prelievo e il deposito delle unità di carico (UdC).

La piattaforma può compiere contemporaneamente due movimenti, uno orizzontale e uno verticale, ai quali consegue un moto composto lungo un tragitto inclinato rispetto ai due movimenti di base. Ciò permette al trasloelevatore di effettuare percorsi di lunghezza minima negli spostamenti tra due qualsiasi posizioni del corridoio. L'indirizzamento lungo gli assi x e y è ottenuto tramite gli encoder, dispositivi particolarmente precisi posti rispettivamente sulla trave di base e sul telaio mobile. Oltre ai movimenti orizzontali e verticali lungo gli assi x e y, è da tenere presente il movimento trasversale lungo l'asse z delle forche telescopiche per introdurre il carico trasportato nello scaffale o per prelevarlo. Mentre i movimenti lungo gli assi x e y possono aver luogo contemporaneamente, quello sull'asse z ha luogo solo a macchina ferma e correttamente posizionata rispetto al vano dello scaffale o al punto di scarico/prelievo delle UdC in corrispondenza delle testate degli scaffali.

1.2 Cicli semplici e cicli combinati

Così come avviene nei magazzini tradizionali, anche nei magazzini automatizzati si possono avere modalità di prelievo/deposito a cicli semplici o combinati.

Un ciclo semplice (o single-command o SC) movimenta una UdC e può essere di prelievo o di deposito (Figura 1.3). Il ciclo semplice di prelievo consiste nel raggiungimento dal punto di

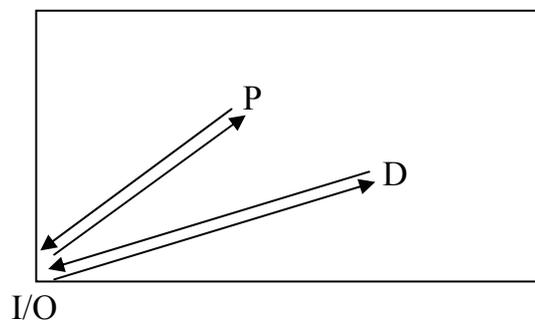


Figura 1.3

input/output (I/O) del vano dal quale prelevare l'UdC a vuoto, cioè senza UdC a bordo del trasloelevatore, e nel

ritorno al punto di I/O con a bordo l'UdC prelevata. Il ciclo semplice di deposito consiste invece nel raggiungimento dal punto di input/output (I/O) del vano nel quale depositare l'UdC con a bordo l'UdC da depositare e nel ritorno al punto di I/O a vuoto.

Un ciclo combinato (o dual-command o DC) movimentata invece due UdC (Figura 1.4). Il ciclo combinato consiste nel raggiungimento dal punto di input/output (I/O) del vano nel quale

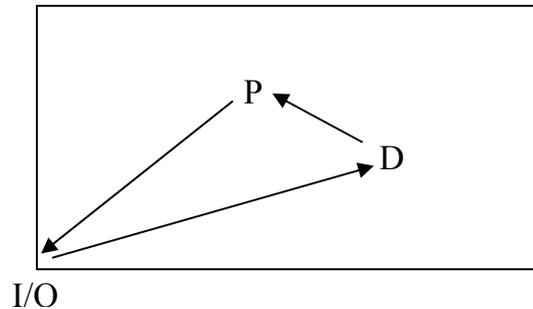


Figura 1.4

depositare l'UdC con a bordo l'UdC da depositare, nello spostamento a vuoto verso il vano dal quale prelevare l'UdC e nel ritorno al punto di I/O con a bordo l'UdC prelevata.

La modalità di prelievo/deposito a cicli semplici presenta una complessità di gestione inferiore rispetto a quella a cicli composti ma comporta anche una minore efficienza a causa dell'incidenza maggiore dei viaggi a vuoto.

Allo scopo di stimare in fase di progetto la capacità di movimentazione di un magazzino, è utile poterne stimare il tempo di ciclo. Il tempo di ciclo è il tempo medio necessario per effettuare un ciclo semplice o combinato con punti di prelievo o deposito qualsiasi.

Il tempo di ciclo può sempre essere scomposto nella somma di un tempo di ciclo fisso e di uno variabile in funzione della posizione dei vani che vengono visitati durante il ciclo. Il tempo di ciclo variabile è costituito dal tempo in cui il trasloelevatore è in movimento, mentre il tempo di ciclo fisso per i magazzini automatizzati comprende fundamentalmente i tempi di carico e scarico delle UdC.

In tutti i modelli trattati il tempo di ciclo fisso non è considerato perché deterministico e indipendente dalla forma della scaffalatura e dalla velocità di traslazione della macchina. Grazie a ciò è, infatti, possibile aggiungerlo al

tempo di ciclo variabile in un secondo momento. D'ora in poi perciò con l'espressione "tempo di ciclo" ci si riferirà al solo tempo di ciclo variabile.

1.3 Il modello di Bozer & White

L'articolo di A.Y. Bozer e J.A. White dal titolo "Travel-time models for automated storage/retrieval systems" del 1984 presenta un modello analitico per la valutazione del tempo di ciclo semplice e combinato in un magazzino automatizzato. Di seguito si riporta il modello in modo sintetico.

Ipotesi:

- si considera una sola scaffalatura servita da un trasloelevatore;
- la scaffalatura è un rettangolo continuo con I/O nell'angolo in basso a sinistra;
- la scaffalatura è genericamente rettangolare nel tempo, cioè il tempo necessario al trasloelevatore per raggiungere dal punto di I/O la massima altezza è diverso da quello necessario per raggiungere la massima distanza orizzontale;
- i trasloelevatori lavorano con cicli semplici o combinati;
- i trasloelevatori viaggiano contemporaneamente nelle direzioni verticale e orizzontale;
- i trasloelevatori viaggiano a velocità verticale e orizzontale costante, cioè non si considera la presenza di accelerazioni;
- equiprobabilità di accesso ai vani: ogni vano ha la stessa probabilità di essere selezionato per il deposito o il prelievo.

Grandezze utilizzate:

- v_h → velocità orizzontale;
- v_v → velocità verticale;
- L → lunghezza scaffalatura;
- H → altezza scaffalatura.

Si trasformino le coordinate spaziali in coordinate temporali:

- $t_h = \frac{L}{v_h} \rightarrow$ tempo necessario per raggiungere la colonna più lontana dall'I/O;
- $t_v = \frac{H}{v_v} \rightarrow$ tempo necessario per raggiungere la riga più lontana dall'I/O;

e si considerino i seguenti parametri:

- $T = \max\{t_h, t_v\} \rightarrow$ fattore di scala;
- $b = \min\left\{\frac{t_h}{T}, \frac{t_v}{T}\right\} \quad 0 \leq b \leq 1 \rightarrow$ fattore di forma.

Si consideri la scaffalatura di dimensioni $b \cdot 1$ e, senza perdita di generalità, si assuma $T = t_h$ e, di conseguenza, $b = \frac{t_v}{T}$.

1.3.1 Calcolo del tempo di ciclo semplice

Si consideri ora il tempo di ciclo semplice $E(SC)$. Esso è costituito dal tempo medio necessario a raggiungere dal punto di I/O un qualsiasi punto della scaffalatura $P(x,y)$, $0 \leq x \leq 1$, $0 \leq y \leq b$ e dal tempo medio necessario per tornare

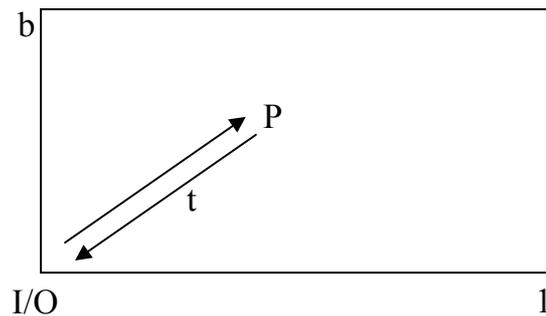


Figura 1.5

al punto di I/O (Figura 1.5). Essi hanno chiaramente lo stesso valore, perciò $E(SC) = 2E(t)$

dove t rappresenta il tempo di percorrenza dal punto di I/O un punto P della scaffalatura o viceversa che può variare tra 0 e 1 ($0 \leq t \leq 1$) e $E(t)$ ne rappresenta il valore medio.

Applicando la definizione di valore medio, si ha che

$$E(t) = \int_{-\infty}^{\infty} zg(z)dz$$

dove $g(t)$ rappresenta la funzione di probabilità di t .

A causa del moto congiunto dei trasloelevatori lungo la direzione orizzontale e verticale, $t = \max\{x, y\}$.

Considerando inoltre la proprietà relativa alla probabilità dell'intersezione di due eventi indipendenti ($x \leq z$ e $y \leq z$), la funzione di ripartizione di t è

$$\begin{aligned} G(z) &= \int_{-\infty}^{\infty} g(t) dt = \\ &= P(t \leq z) = \\ &= P(x \leq z)P(y \leq z) . \end{aligned}$$

Essendo valida l'ipotesi di equiprobabilità di accesso ai vani, si ha che

$$P(x \leq z) = \begin{cases} 0 & \text{se } z < 0 \\ z & \text{se } 0 \leq z \leq 1 \\ 1 & \text{se } z > 1 \end{cases}$$

poiché presenta una distribuzione uniforme tra 0 e 1 e

$$P(y \leq z) = \begin{cases} 0 & \text{se } z < 0 \\ \frac{z}{b} & \text{se } 0 \leq z \leq b \\ 1 & \text{se } z > b \end{cases}$$

poiché presenta una distribuzione uniforme tra 0 e b .

Quindi:

$$G(z) = \begin{cases} 0 & \text{se } z < 0 \\ \frac{z^2}{b} & \text{se } 0 \leq z \leq b \\ \frac{z}{b} & \text{se } b < z \leq 1 \\ 1 & \text{se } z > 1 \end{cases} ,$$

$$g(z) = \frac{dG(z)}{dz} = \begin{cases} 0 & \text{se } z < 0 \\ 2 \frac{z}{b} & \text{se } 0 \leq z \leq b \\ 1 & \text{se } b < z \leq 1 \\ 0 & \text{se } z > 1 \end{cases} ,$$

$$\begin{aligned} E(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} zg(z) dz = \\ &= \int_{t=0}^b zg(z) dz + \int_{t=b}^1 zg(z) dz = \\ &= \int_{t=0}^b 2 \frac{z^2}{b} dz + \int_{t=b}^1 z dz = \\ &= 2 \cdot \frac{b^3}{3b} + \frac{1}{2} - \frac{1}{2} b = \\ &= \frac{2}{3} b^2 - \frac{1}{2} b^2 + \frac{1}{2} = \frac{1}{6} b^2 + \frac{1}{2} , \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E(SC) &= 2 \cdot E(t) = \\
&= 2 \left(\frac{1}{6} b^2 + \frac{1}{2} \right) = \\
&= \frac{1}{3} b^2 + 1 .
\end{aligned}$$

1.3.2 Calcolo del tempo di ciclo combinato

Si consideri ora il tempo di ciclo combinato $E(DC)$. Esso è costituito dal tempo medio necessario a raggiungere dal punto di I/O un qualsiasi punto della scaffalatura $P_1(x_1, y_1)$, $0 \leq x_1 \leq 1$, $0 \leq y_1 \leq b$, dal tempo medio necessario per raggiungere da P_1 un altro punto qualsiasi della scaffalatura $P_2(x_2, y_2)$, $0 \leq x_2 \leq 1$, $0 \leq y_2 \leq b$, e dal tempo medio necessario per tornare da P_2 al punto di I/O. Si noti che il primo e il terzo tratto presentano la stessa durata media di un ciclo semplice perciò, chiamato $E(TB)$ il tempo medio di percorrenza del secondo tratto,

$$\begin{aligned}
E(DC) &= E(TB) + E(SC) = \\
&= \frac{1}{3} b^2 + 1 + E(SC) .
\end{aligned}$$

Si consideri t_b il tempo di percorrenza tra due vani, allora

$$E(TB) = E(t_b) ,$$

cioè il valore medio di t_b .

Applicando la definizione di valore medio, si ha che

$$E(t_b) = \int_{-\infty}^{\infty} z f(z) dz$$

dove $f(z)$ rappresenta la funzione di probabilità di t_b .

A causa del moto congiunto dei trasloelevatori lungo la direzione orizzontale e verticale, $t_b = \max\{|x_1 - x_2|, |y_1 - y_2|\}$.

Considerando inoltre la proprietà relativa alla probabilità dell'intersezione di due eventi indipendenti ($|x_1 - x_2| \leq z$ e $|y_1 - y_2| \leq z$), la funzione di ripartizione di t_b è

$$\begin{aligned}
F(z) &= \int_{-\infty}^{\infty} f(t_b) dt_b = \\
&= P(t_b \leq z) = \\
&= P(|x_1 - x_2| \leq z) P(|y_1 - y_2| \leq z) =
\end{aligned}$$

$$= F_x(z) \cdot F_y(z) .$$

Per la valutazione di $F_x(z) = P(|x_1 - x_2| \leq z)$ e di $F_y(z) = P(|y_1 - y_2| \leq z)$, si consideri la seguente proprietà.

Proprietà:

Definito $R = x_1 - x_n$ il range di un campione di numerosità n , ossia la differenza tra i suoi valori estremi, allora:

$$H(r) = P(R \leq r) =$$

$$= n \int_{v=-\infty}^{\infty} f(v)[F(v+r) - F(v)]^{n-1} dv .$$

Dimostrazione:

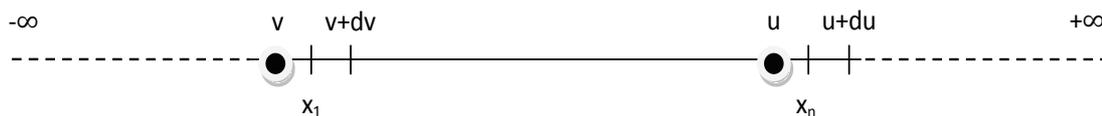


Figura 1.6

Si ipotizzi che $x_1 \in [v, v + dv[$ e $x_n \in [u, u + du[$.

Si hanno dunque 5 intervalli:

- | | |
|---------------------------|--|
| $I_1 =]-\infty, v[$ | in cui non esistono elementi del campione; |
| $I_2 = [v, v + dv[$ | in cui esiste un solo elemento del campione; |
| $I_3 = [v + dv; u[$ | in cui esistono $(n - 2)$ elementi del campione; |
| $I_4 = [u, u + du[$ | in cui esiste un solo elemento del campione; |
| $I_5 = [u + du, +\infty[$ | in cui non esistono elementi del campione. |

In generale, la probabilità che un elemento cada all'interno di un intervallo è:

$$P(x_i \in I_1) = F(v) ;$$

$$P(x_i \in I_2) = F(v + dv) - F(v) =$$

$$= \frac{F(v+dv) - F(v)}{dv} dv =$$

$$= f(v)dv ;$$

$$P(x_i \in I_3) = F(u) - F(v + dv) \cong \\ \cong F(u) - F(v) ;$$

$$P(x_i \in I_4) = F(u + du) - F(u) = \\ = \frac{F(u+du)-F(u)}{du} du = \\ = f(u)du ;$$

$$P(x_i \in I_5) = 1 - F(u + du) \cong \\ \cong 1 - F(u) .$$

Date queste ipotesi, la probabilità che tutti gli eventi accadano è data dalla distribuzione multinomiale:

$$P(x_1, \dots, x_n \notin I_1 \wedge x_1 \in I_2 \wedge x_2, \dots, x_{n-1} \in I_3 \wedge x_n \in I_4 \wedge x_1, \dots, x_n \notin I_5) = \\ = \frac{n!}{0!1!(n-2)!1!0!} P_1^0 P_2^1 P_3^{(n-2)} P_4^1 P_5^0 = \\ = \frac{n!}{(n-2)!} [F(v)]^0 [f(v)dv]^1 [F(u) - F(v)]^{(n-2)} [f(u)du]^1 [1 - F(u)]^0 = \\ = \frac{n(n-1)(n-2)!}{(n-2)!} f(v)f(u)dvdu[F(u) - F(v)]^{(n-2)} = \\ = n(n-1)f(v)f(u)dvdu[F(u) - F(v)]^{(n-2)} = \\ = h(u,v)dudv .$$

Considerando che $-\infty < v < u < +\infty$ e che $R = u - v$, l'evento $R \leq r$ equivale a $u \leq v + r$.

Chiamata $H(r)$ la funzione densità di probabilità del range, si ottiene:

$$H(r) = P(R \leq r) = \\ = P(u \leq v + r) = \\ = \int_{-\infty}^{\infty} \int_v^{v+r} n(n-1)[F(u) - F(v)]^{(n-2)} f(u)f(v)dudv = \\ = n(n-1) \int_{-\infty}^{\infty} f(v) \left\{ \int_v^{v+r} [F(u) - F(v)]^{(n-2)} f(u)du \right\} dv .$$

Posto $F(u) = s$, $f(u)du = ds$, se $u = v + r$, allora $s = F(v + r)$, se $u = v$, allora $s = F(v)$ e si può scrivere:

$$H(r) = n(n-1) \int_{-\infty}^{\infty} f(v) \left\{ \int_{F(v)}^{F(v+r)} [s - F(v)]^{(n-2)} ds \right\} dv = \\ = n(n-1) \int_{-\infty}^{\infty} f(v) \left[\frac{1 * [s - F(v)]^{(n-1)}}{n-1} \right]_{F(v)}^{F(v+r)} dv =$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{n(n-1)}{n-1} \int_{-\infty}^{\infty} f(v) \{ [F(v+r) - F(v)]^{(n-1)} - [F(v) - F(v)]^{(n-1)} \} dv = \\
&= n \int_{-\infty}^{\infty} f(v) [F(v+r) - F(v)]^{(n-1)} dv .
\end{aligned}$$

Si consideri ora il termine $P(|y_1 - y_2| \leq z) = F_y(z)$. Si considerino y_1 e y_2 come i due elementi di un campione di numerosità 2 e $|y_1 - y_2|$ il range del campione. Allora $H(r)$ rappresenta la probabilità che il range $|y_1 - y_2|$ sia inferiore a r mentre $h(r) = \frac{dH(r)}{dr}$ rappresenta la probabilità che il range $|y_1 - y_2|$ sia pari a r .

In generale si ha che

$$h(r) = n(n-1) \int_{-\infty}^{\infty} [F(v+r) - F(v)]^{(n-2)} f(v)f(v+r)dv ;$$

ponendo $n = 2$ si ottiene:

$$\begin{aligned}
h(r) &= 2(2-1) \int_{-\infty}^{\infty} [F(v+r) - F(v)]^{2-2} f(v)f(v+r) dv = \\
&= 2 \int_{-\infty}^{\infty} f(v)f(v+r) dv .
\end{aligned}$$

Ricordando che, come nel caso precedente, si ha che

$$f(y) = \begin{cases} 0 & \text{se } y < 0 \\ \frac{1}{b} & \text{se } 0 \leq y \leq b , \\ 0 & \text{se } y > b \end{cases}$$

allora:

$$f(v) = \begin{cases} 0 & \text{se } v < 0 \\ \frac{1}{b} & \text{se } 0 \leq v \leq b - r \\ 0 & \text{se } v > b - r \end{cases}$$

e

$$f(v+r) = \begin{cases} 0 & \text{se } v < 0 \\ \frac{1}{b} & \text{se } 0 \leq v \leq b - r . \\ 0 & \text{se } v > b - r \end{cases}$$

Da ciò deriva che

$$\begin{aligned}
h(r) &= 2 \int_0^{b-r} \frac{1}{b} \cdot \frac{1}{b} dv = \\
&= 2 \frac{1}{b^2} [v]_0^{b-r} = \\
&= 2 \frac{1}{b^2} (b-r)
\end{aligned}$$

e che

$$\begin{aligned}
 F_y(z) &= P(|y_1 - y_2| \leq z) = \\
 &= \int_0^z h(r) dr = \\
 &= \int_0^z 2 \frac{1}{b^2} (b - r) dr = \\
 &= 2 \frac{1}{b^2} \left[br - \frac{r^2}{2} \right]_0^z = \\
 &= 2 \frac{1}{b^2} \left(bz - \frac{z^2}{2} \right) = \\
 &= \frac{2z}{b} - \frac{z^2}{b^2} = \\
 &= \begin{cases} 0 & \text{se } z < 0 \\ \frac{2z}{b} - \frac{z^2}{b^2} & \text{se } 0 \leq z \leq b. \\ 1 & \text{se } z > b \end{cases}
 \end{aligned}$$

Si consideri ora il termine $P(|x_1 - x_2| \leq z) = F_x(z)$.

Procedendo in modo analogo a quanto fatto per $F_y(z)$, si ottiene

$$\begin{aligned}
 F_x(z) &= \int_0^z 2(1 - r) dr = \\
 &= 2 \left[r - \frac{r^2}{2} \right]_0^z = \\
 &= 2 \left(z - \frac{z^2}{2} \right) = \\
 &= 2z - z^2 = \\
 &= \begin{cases} 0 & \text{se } z < 0 \\ 2z - z^2 & \text{se } 0 \leq z \leq 1. \\ 1 & \text{se } z > 1 \end{cases}
 \end{aligned}$$

Quindi:

$$F(z) = F_x(z) \cdot F_y(z) = \begin{cases} 0 & \text{se } z < 0 \\ (2z - z^2) \left(\frac{2z}{b} - \frac{z^2}{b^2} \right) & \text{se } 0 \leq z \leq b. \\ 2z - z^2 & \text{se } b < z \leq 1, \\ 1 & \text{se } z > 1 \end{cases}$$

$$f(z) = \frac{dF(z)}{dz} = \begin{cases} 0 & \text{se } z < 0 \\ (2 - 2z) \left(\frac{2z}{b} - \frac{z^2}{b^2} \right) + (2z - z^2) \left(\frac{2}{b} - \frac{2z}{b^2} \right) & \text{se } 0 \leq z \leq b. \\ 2 - 2z & \text{se } b < z \leq 1, \\ 0 & \text{se } z > 1 \end{cases}$$

$$E(TB) = E(t_b) =$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} zf(z)dz =$$

$$= \int_0^b z \left[(2 - 2z) \left(\frac{2z}{b} - \frac{z^2}{b^2} \right) + (2z - z^2) \left(\frac{2}{b} - \frac{2z}{b^2} \right) \right] dz +$$

$$+ \int_b^1 z(2 - 2z) dz =$$

$$= \int_0^b \left(\frac{4z^4}{b^2} - \frac{6z^3}{b^2} - \frac{6z^4}{b} + \frac{8z^2}{b} \right) dz + \int_b^1 (2z - 2z^2) dz =$$

$$= \left[\frac{4z^5}{5b^2} - \frac{6z^4}{4b^2} - \frac{6z^4}{4b} + \frac{8z^3}{3b} \right]_0^b + \left[\frac{2z^2}{2} - \frac{2z^3}{3} \right]_b^1 =$$

$$= \frac{1}{3} + \frac{1}{6}b^2 - \frac{1}{30}b^3;$$

$$E(DC) = E(TB) + E(SC) =$$

$$= \frac{b^2}{3} + 1 + E(SC) =$$

$$= \frac{1}{3}b^2 + 1 + \frac{1}{3} + \frac{1}{6}b^2 - \frac{1}{30}b^3 =$$

$$= \frac{4}{3} + \frac{1}{2}b^2 - \frac{1}{30}b^3.$$

2 TRASLOELEVATORI MULTI-SHUTTLE

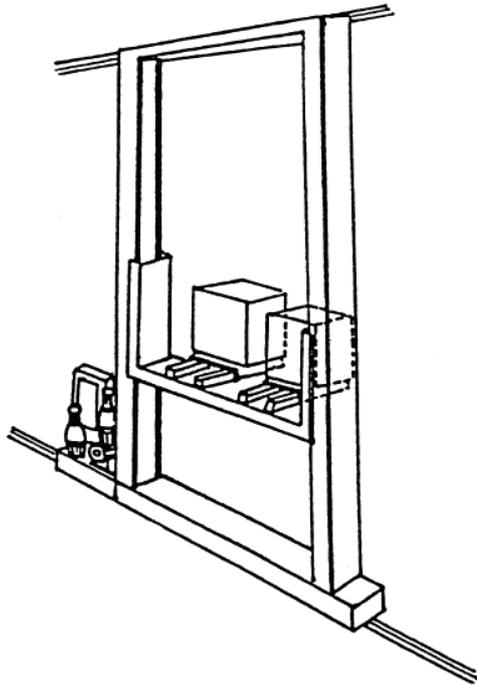


Figura 2.1

I trasloelevatori multi-shuttle costituiscono l'evoluzione dei trasloelevatori single-shuttle presentati nel precedente capitolo. Si tratta di trasloelevatori dotati di due o più coppie di forche retrattili che permettono di movimentare contemporaneamente più di una UdC (Figura 2.1).

La capacità di movimentazione di un AS/RS aumenta con l'aumentare del numero di shuttle poiché, corrispondentemente, diminuisce il numero di viaggi a vuoto necessari.

Chiaramente vi è un aumento di capacità decrescente per ciascuno shuttle aggiuntivo mentre l'investimento necessario aumenta di volta in volta. Per questo motivo non risultano convenienti trasloelevatori con più di tre shuttle (triple-shuttle) mentre sono abbastanza diffusi quelli a due shuttle (twin-shuttle).

2.1 Cicli combinati per trasloelevatori multi-shuttle

I sistemi single-shuttle possono eseguire al massimo un deposito e un prelievo in un ciclo combinato dual-command o DC.

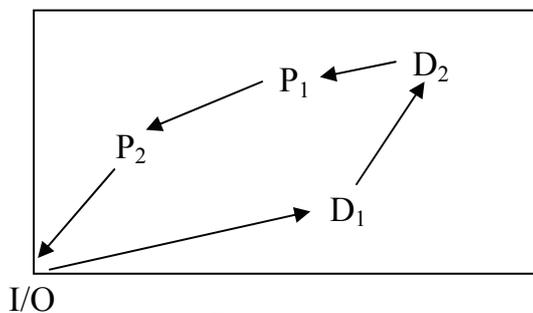


Figura 2.2

In un sistema twin-shuttle il trasloelevatore può eseguire fino a due depositi e due prelievi in un unico ciclo combinato quadruple-command o QC (Figura 2.2). Questo ciclo movimentata perciò quattro UdC.

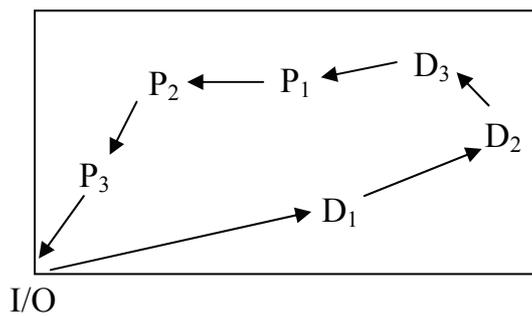


Figura 2.3

Allo stesso modo, sistemi triple-shuttle possono eseguire fino a tre depositi e tre prelievi in un ciclo combinato sextuple-command o STC (Figura 2.3). Questo ciclo movimentata perciò sei UdC.

2.2 Accenni ai modelli di Meller & Mungwattana

Gli articoli di R.D. Meller e A. Mungwattana del 1995 e del 1997 dal titolo “Multi-shuttle automated storage/retrieval systems” presentano alcuni modelli analitici per la valutazione del tempo di ciclo rispettivamente per trasloelevatori twin-shuttle e triple-shuttle.

In questa sede non interessa illustrare tali modelli in maniera esaustiva ma solamente riportare alcune idee espone negli articoli citati che si sono rivelate utili per la creazione del modello analitico oggetto di questa trattazione.

Meller e Mungwattana calcolano il tempo di ciclo per trasloelevatori twin-shuttle e triple-shuttle mantenendo le ipotesi di Bozer e White. In particolare esprimono i tempi di ciclo come combinazione di tempi di ciclo single-command $E(SC)$ e di $E(TB)$ come calcolati da Bozer e White.

Si può infatti dire che il tempo di ciclo di un quadruple-command vale

$$E(QC) = E(SC) + 3E(TB) ,$$

mentre quello di un ciclo sextuple-command in un sistema triple-shuttle vale

$$E(STC) = E(SC) + 5E(TB) .$$

Un altro contributo fondamentale di Meller e Mungwattana è l'introduzione dei cicli modificati per la riduzione del tempo di ciclo e il conseguente aumento di efficienza. Essi partono dalla considerazione

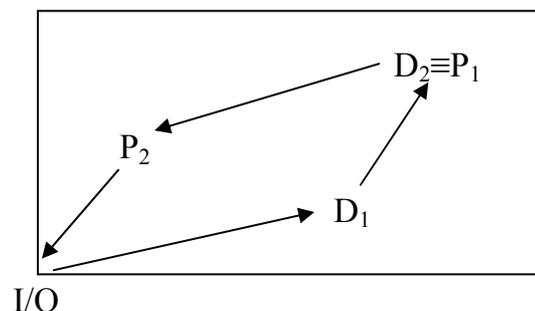


Figura 2.4

che il magazzino è organizzato per posti condivisi quindi ciascuna UdC può essere depositata in qualunque vano disponibile. Tenendo conto di ciò, un ciclo QC può essere modificato eseguendo il secondo deposito nella stessa posizione del primo prelievo (Figura 2.4) mentre un ciclo STC può essere modificato eseguendo il secondo deposito nella stessa posizione del primo prelievo e il terzo deposito nella stessa posizione del secondo prelievo (Figura 2.5).

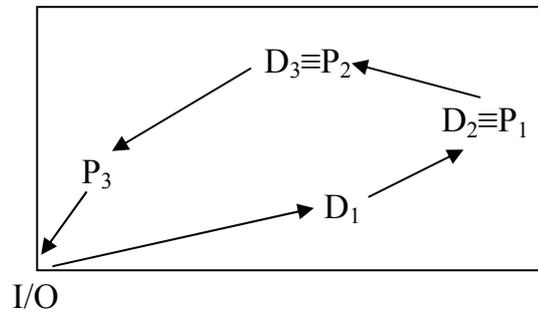


Figura 2.5

In un sistema twin-shuttle ci riferiamo al ciclo migliorato come a un ciclo quadruple-command modificato o MQC che ha un tempo di ciclo pari a quello di un ciclo single-command e due travel-between time poiché si elimina un travel-between time:

$$E(\text{MQC}) = E(\text{SC}) + 2E(\text{TB}) .$$

In un sistema triple-shuttle il ciclo corrispondente è chiamato ciclo sextuple-command modificato o MSC che presenta un tempo di ciclo equivalente a quello di un ciclo single-command e tre travel-between time poiché si eliminano due travel-between time:

$$E(\text{MSC}) = E(\text{SC}) + 3E(\text{TB}) .$$

3 CRITERI DI ALLOCAZIONE DELLA MERCE

Nei magazzini automatizzati, così come in quelli tradizionali, sono possibili diversi criteri di allocazione della merce:

- per posti condivisi o shared storage → qualunque articolo può essere ubicato in qualunque vano;
- per posti dedicati o dedicated storage → ogni articolo ha dei vani dedicati in esclusiva;
- per zone dedicate o class-based storage → soluzione intermedia tra le precedenti.

3.1 Allocazione della merce per zone dedicate

L'area del magazzino, o della singola scaffalatura nel caso di magazzini automatizzati, viene suddivisa in zone in funzione della facilità di accesso ai vani. I prodotti sono suddivisi in un numero di classi pari al numero di zone in base al loro contributo alla domanda totale utilizzando, ad esempio, un diagramma di Pareto. Si attribuisce una classe a ogni zona in modo che le classi a domanda più alta siano associate alle zone dal più facile raggiungimento (Figura 3.1). All'interno di ogni zona si allocano i prodotti della classe corrispondente secondo il criterio per posti condivisi. Ciò permette di sfruttare i vantaggi in termini di efficienza dell'allocazione per posti dedicati e di semplicità di quella per posti condivisi.

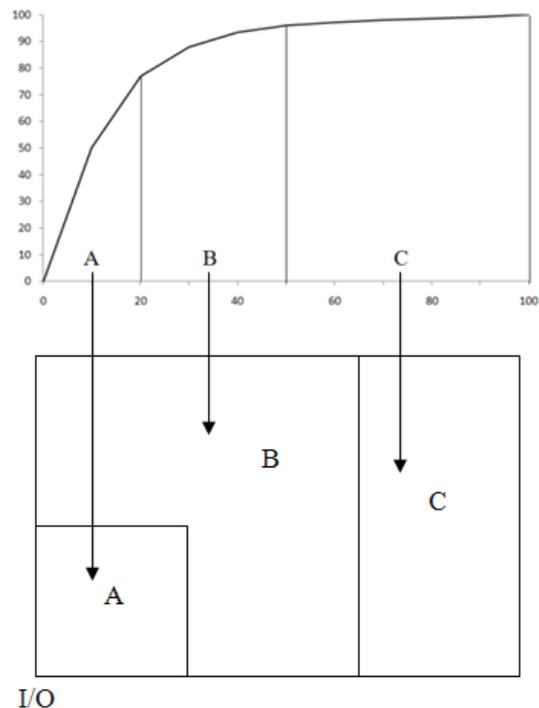


Figura 3.1

3.2 Il modello di Eynan e Rosenblatt

L'articolo di A. Eynan e M.J. Rosenblatt dal titolo "Establishing zones in single-command class-based rectangular AS/RS" del 1994 presenta un modello analitico per la suddivisione ottimale in zone di un magazzino automatizzato. Di seguito si riporta il modello in modo sintetico nel caso di suddivisione in tre zone.

Ipotesi:

- tutti i vani sono della stessa dimensione e ogni vano contiene solo un tipo di prodotto;
- si considera una sola scaffalatura servita da un trasloelevatore che viaggia contemporaneamente nelle direzioni verticale e orizzontale;
- la scaffalatura è genericamente rettangolare nel tempo, cioè il tempo necessario al trasloelevatore per raggiungere dal punto di I/O la massima altezza è diverso da quello necessario per raggiungere la massima distanza orizzontale;
- il punto di I/O si trova nell'angolo in basso a sinistra;
- la domanda è costante e nota per ciascun prodotto;
- i prodotti sono approvvigionati tramite una strategia di EOQ;
- i trasloelevatori lavorano con cicli semplici;
- i trasloelevatori viaggiano a velocità verticale e orizzontale costante, cioè non si considera la presenza di accelerazioni;
- equiprobabilità di accesso ai vani: ogni vano ha la stessa probabilità di essere selezionato per il deposito o il prelievo;
- i prodotti sono ordinati in base alla loro contribuzione alla domanda totale, dando origine alla ben nota curva ABC.

Il primo passo da effettuare per la progettazione del magazzino è la suddivisione dei prodotti nei corridoi. Fatto ciò si può applicare il modello in esame che considera ogni corridoio separatamente.

Grandezze utilizzate:

- $t_h \rightarrow$ tempo necessario per raggiungere la colonna più lontana dall'I/O;
- $t_v \rightarrow$ tempo necessario per raggiungere la riga più lontana dall'I/O.

Si definisca il fattore di forma $b = \min \left\{ \frac{t_h}{t_v}, \frac{t_v}{t_h} \right\}$ $0 \leq b \leq 1$. Per comodità e senza perdita di generalità, si assuma che $t_h \leq t_v$ e perciò $b = \frac{t_h}{t_v}$.

Si normalizzi l'area della scaffalatura a uno. In altre parole, il prodotto dell'altezza per la lunghezza in unità temporali sia pari a uno: $h \times v = 1$.

Perciò, con un fattore di forma pari a b , si richiede che $\frac{h}{v} = b$. Risolvendo rispetto ad h e v , si ottiene che $h = \sqrt{b}$ e $v = \frac{1}{\sqrt{b}}$.

Nota la domanda dei prodotti, si costruisce il diagramma della domanda cumulata. Esso assume generalmente una forma approssimabile come $G(j) = j^s = \int_0^j D(k)dk$ dove $G(j)$ è la domanda cumulata di tutti i prodotti fino all' j -esimo, $D(j)$ è la domanda del prodotto j -esimo e $D(j) = sj^{s-1}$. Il parametro s , variabile tra 0 e 1, deve essere scelto in modo che la curva rappresenti al meglio il diagramma ottenuto sperimentalmente.

3.2.1 Tipologie di zone

In una scaffalatura rettangolare rispetto al tempo si possono generalmente distinguere tre differenti tipi di zone:

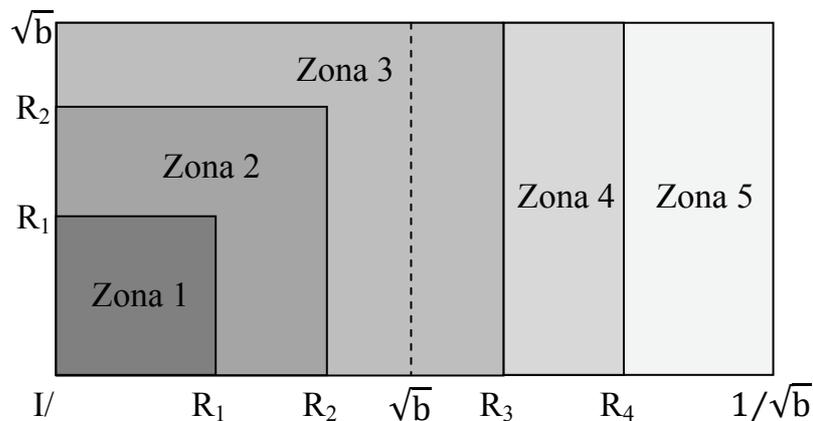


Figura 3.2

- Zone Quadrate: zone con confini $R_i \leq \sqrt{b}$; formano, assieme alle precedenti zone, aree quadrate rispetto al tempo di dimensione $R_i \cdot R_i$ (Zona 1 e Zona 2 di Figura 3.2);
- Zone Rettangolari: zone per le quali $R_{i-1} \geq \sqrt{b}$; formano, assieme alle precedenti zone, aree rettangolari rispetto al tempo di dimensione $R_i \cdot \sqrt{b}$ (Zona 4 e Zona 5 di Figura 3.2);
- Zona di Transizione: zona di passaggio tra le zone quadrate e quelle rettangolari per la quale $R_{i-1} < b$ e $R_i > \sqrt{b}$; forma, assieme alle precedenti zone, un'area rettangolare rispetto al tempo di dimensione $R_i \cdot \sqrt{b}$. Si noti che teoricamente questa regione può non esistere; ciò accade quando i confini dell'ultima regione quadrata sono esattamente a \sqrt{b} (Zona 3 di Figura 3.2).

3.2.2 Calcolo di t_i e G_i per ogni tipologia di zona

Ciascuna zona del magazzino è caratterizzata da (t_i, G_i) , dove:

t_i → tempo medio di viaggio dal punto di I/O alla classe assegnata alla zona i ;

G_i → domanda cumulata dei prodotti fino alla classe i inclusa;

x → distanza (temporale) dal punto di I/O a ciascun punto della zona.

I valori di t_i per ogni tipo di zona sono i seguenti:

- Zone Quadrate:

$$t_i = \frac{\int_{R_{i-1}}^{R_i} 2x \cdot x \, dx}{\int_{R_{i-1}}^{R_i} 2x \, dx} = \frac{2}{3} \frac{R_i^3 - R_{i-1}^3}{R_i^2 - R_{i-1}^2};$$

- Zone Rettangolari:

$$t_i = \frac{\int_{R_{i-1}}^{R_i} x\sqrt{b} \, dx}{\int_{R_{i-1}}^{R_i} \sqrt{b} \, dx} = \frac{R_i + R_{i-1}}{2};$$

- Zona di Transizione:

$$t_i = \frac{\int_{R_{i-1}}^{\sqrt{b}} 2x \cdot x \, dx + \int_{\sqrt{b}}^{R_i} x\sqrt{b} \, dx}{\int_{R_{i-1}}^{\sqrt{b}} 2x \, dx + \int_{\sqrt{b}}^{R_i} \sqrt{b} \, dx} =$$

$$= \frac{\frac{1}{6}b^{\frac{3}{2}} - \frac{2}{3}R_{i-1}^3 + \frac{1}{2}b^{\frac{1}{2}}R_i^2}{\sqrt{b}R_i - R_{i-1}^2}.$$

Per il calcolo dei valori di G_i per ogni tipo di zona, si ricordi che l'approvvigionamento di ogni prodotto j è gestito secondo il modello del lotto economico EOQ per il quale $Q_j^* = \sqrt{2KD(j)}$, dove K è il rapporto tra il costo di ordinazione e il costo mantenimento a scorta che, per semplicità, è supposto costante per tutti i prodotti. Considerato il grande numero di prodotti nel magazzino, si può affermare che in media il numero totale di vani necessari è $\int_0^1 \frac{Q_j}{2} \, dj$.

Sia A_i l'area totale richiesta per le classi fino all' i -esima compresa. Allora, poiché ogni vano ha la stessa dimensione, si ha che:

$$A_i = \int_0^{\alpha_i} \frac{Q_j}{2} \, dj =$$

$$= \int_0^{\alpha_i} \frac{\sqrt{2KD(j)}}{2} \, dj$$

dove α_i è l'ultimo prodotto (%) del i -esima classe.

Sostituendo con $D(j) = sj^{s-1}$, si ottiene

$$A_i = \frac{\sqrt{2Ks}}{s+1} \cdot \alpha_i^{(s+1)/2}.$$

Considerando l'intero magazzino, si può sostituire $\alpha_i = 1$ e $A_i = 1$ e si ottiene:

$$1 = \frac{\sqrt{2Ks}}{s+1}.$$

Perciò:

$$\frac{A_i}{1} = \alpha_i^{(s+1)/2}$$

e

$$\alpha_i = \left(\frac{A_i}{1}\right)^{\frac{2}{s+1}} = A_i^{\frac{2}{s+1}}.$$

Ora, si sa che $G_i = \alpha_i^s$ e, sostituendo con $\alpha_i = A_i^{\frac{2}{s+1}}$, si ottiene:

$$G_i = A_i^{\frac{2s}{s+1}} .$$

I valori di G_i per ogni tipo di zona sono quindi i seguenti:

- Zone Quadrate:

$$G_i = (R_i^2)^{\frac{2s}{s+1}} = R_i^{\frac{4s}{s+1}} ;$$

- Zone Rettangolari:

$$G_i = (\sqrt{b}R_i)^{\frac{2s}{s+1}} ;$$

- Zona di Transizione:

$$G_i = (\sqrt{b}R_i)^{\frac{2s}{s+1}} .$$

3.2.3 Tempo di ciclo per magazzini organizzati con tre zone

Si consideri ora il tempo di ciclo semplice $E(SC)$ per un magazzino organizzato con tre zone. Esso è costituito dal tempo medio necessario a raggiungere dal punto di I/O un qualsiasi punto della scaffalatura e dal tempo medio necessario per tornare al punto di I/O. Essi hanno chiaramente lo stesso valore, perciò

$$E(SC) = 2E(t)$$

dove t rappresenta il tempo di percorrenza dal punto di I/O un punto P della scaffalatura o viceversa e $E(t)$ ne rappresenta il valore medio.

$E(t)$ può essere calcolato come somma dei prodotti dei t_i e dei G_i di ogni regione:

$$E(t) = \sum_{i=1}^3 t_i(G_i - G_{i-1}) .$$

Dividendo la scaffalatura rettangolare in tre zone, risultano due possibili configurazioni.

La prima configurazione (Figura 3.3) consiste in:

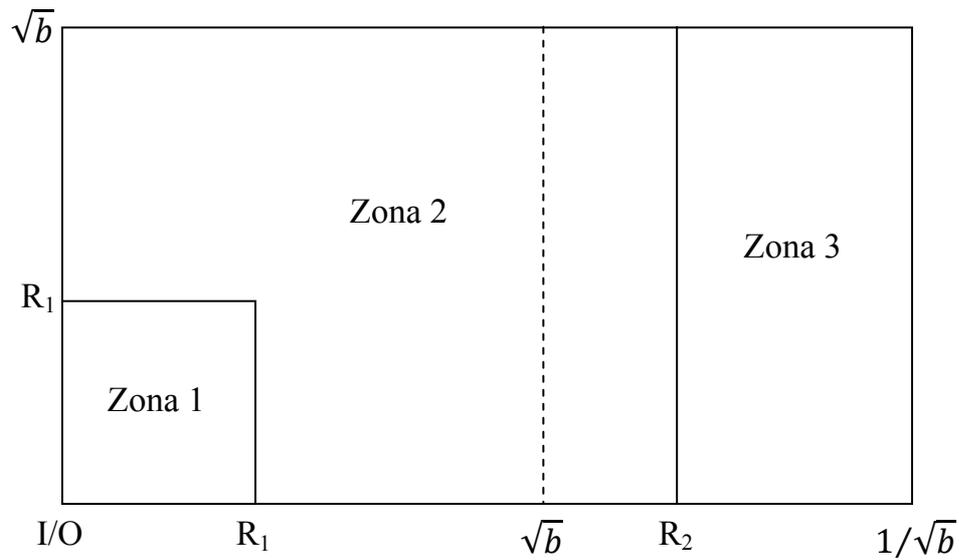


Figura 3.3

- Zona 1 → zona quadrata:

$$t_1 = \frac{2 R_1^3 - 0^3}{3 R_1^2 - 0^2} =$$

$$= \frac{2}{3} R_1 ,$$

$$G_1 = R_1^{\frac{4s}{s+1}} ;$$

- Zona 2 → zona di transizione:

$$t_2 = \frac{\frac{1}{6}b^{\frac{3}{2}} - \frac{2}{3}R_1^3 + \frac{1}{2}b^{\frac{1}{2}}R_2^2}{\sqrt{b}R_2 - R_1^2} ,$$

$$G_2 = (\sqrt{b}R_2)^{\frac{2s}{s+1}} ;$$

- Zona 3 → zona rettangolare:

$$t_3 = \frac{R_3 + R_2}{2} ,$$

$$G_3 = (\sqrt{b}R_3)^{\frac{2s}{s+1}} .$$

Perciò:

$$E(t) = t_1(G_1 - G_0) + t_2(G_2 - G_1) + t_3(G_3 - G_2) =$$

$$= \frac{2}{3} R_1 \cdot R_1^{\frac{4s}{s+1}} + \frac{\frac{1}{6} b^{\frac{3}{2}} - \frac{2}{3} R_1^3 + \frac{1}{2} b^{\frac{1}{2}} R_2^2}{\sqrt{b} R_2 - R_1^2} \left[(\sqrt{b} R_2)^{\frac{2s}{s+1}} - R_1^{\frac{4s}{s+1}} \right] + \frac{R_3 + R_2}{2} \cdot \left[(\sqrt{b} R_3)^{\frac{2s}{s+1}} - (\sqrt{b} R_2)^{\frac{2s}{s+1}} \right]$$

e

$$\begin{aligned} E(SC) &= 2 \cdot \left\{ \frac{2}{3} R_1 R_1^{\frac{4s}{s+1}} + \frac{\frac{1}{6} b^{\frac{3}{2}} - \frac{2}{3} R_1^3 + \frac{1}{2} b^{\frac{1}{2}} R_2^2}{\sqrt{b} R_2 - R_1^2} \left[(\sqrt{b} R_2)^{\frac{2s}{s+1}} - R_1^{\frac{4s}{s+1}} \right] + \right. \\ &\quad \left. + \frac{R_3 + R_2}{2} \left[(\sqrt{b} R_3)^{\frac{2s}{s+1}} - (\sqrt{b} R_2)^{\frac{2s}{s+1}} \right] \right\} = \\ &= \frac{4}{3} R_1 R_1^{\frac{4s}{s+1}} + \frac{\frac{1}{6} b^{\frac{3}{2}} - \frac{4}{3} R_1^3 + b^{\frac{1}{2}} R_2^2}{\sqrt{b} R_2 - R_1^2} \left[(\sqrt{b} R_2)^{\frac{2s}{s+1}} - R_1^{\frac{4s}{s+1}} \right] + \\ &\quad + (R_3 + R_2) \left[(\sqrt{b} R_3)^{\frac{2s}{s+1}} - (\sqrt{b} R_2)^{\frac{2s}{s+1}} \right]. \end{aligned}$$

La seconda configurazione (Figura 3.4) consiste in:

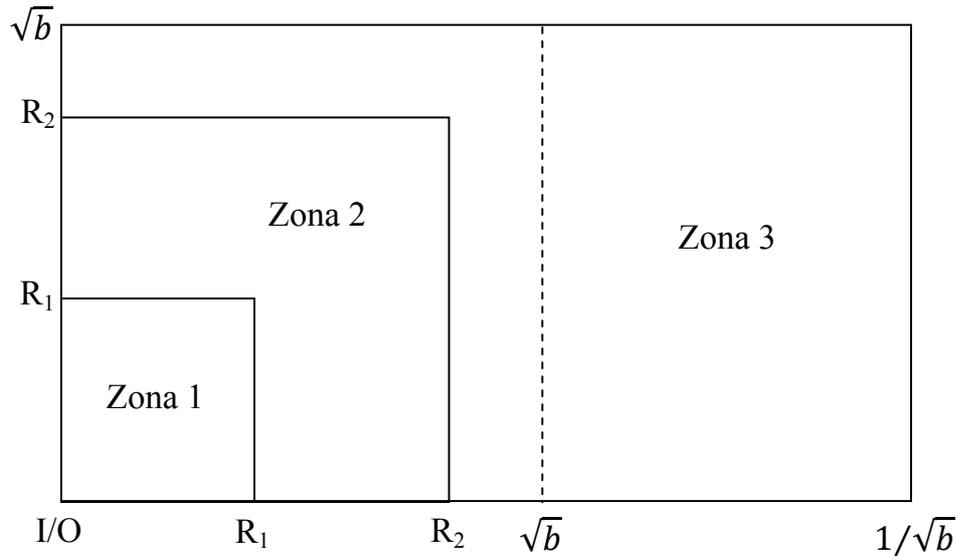


Figura 3.4

- Zona 1 → zona quadrata:

$$\begin{aligned} t_1 &= \frac{2 R_1^3 - 0^3}{3 R_1^2 - 0^2} = \\ &= \frac{2}{3} R_1, \end{aligned}$$

$$G_1 = R_1^{\frac{4s}{s+1}};$$

- Zona 2 → zona quadrata:

$$t_2 = \frac{2 R_2^3 - R_1^3}{3 R_2^2 - R_1^2},$$

$$G_2 = R_2^{\frac{4s}{s+1}};$$

- Zona 3 → zona di transizione:

$$t_3 = \frac{\frac{1}{6}b^{\frac{3}{2}} - \frac{2}{3}R_2^3 + \frac{1}{2}b^{\frac{1}{2}}R_3^2}{\sqrt{b}R_3 - R_2^2},$$

$$G_3 = (\sqrt{b}R_3)^{\frac{2s}{s+1}}.$$

Perciò:

$$\begin{aligned} E(t) &= t_1(G_1 - G_0) + t_2(G_2 - G_1) + t_3(G_3 - G_2) = \\ &= \frac{2}{3}R_1R_1^{\frac{4s}{s+1}} + \frac{2 R_2^3 - R_1^3}{3 R_2^2 - R_1^2} \left[R_2^{\frac{4s}{s+1}} - R_1^{\frac{4s}{s+1}} \right] + \\ &+ \frac{\frac{1}{6}b^{\frac{3}{2}} - \frac{2}{3}R_2^3 + \frac{1}{2}b^{\frac{1}{2}}R_3^2}{\sqrt{b}R_3 - R_2^2} \left[(\sqrt{b}R_3)^{\frac{2s}{s+1}} - R_2^{\frac{4s}{s+1}} \right] \end{aligned}$$

e

$$\begin{aligned} E(SC) &= 2 \left\{ \frac{2}{3}R_1R_1^{\frac{4s}{s+1}} + \frac{2 R_2^3 - R_1^3}{3 R_2^2 - R_1^2} \left[R_2^{\frac{4s}{s+1}} - R_1^{\frac{4s}{s+1}} \right] + \right. \\ &\left. \frac{\frac{1}{6}b^{\frac{3}{2}} - \frac{2}{3}R_2^3 + \frac{1}{2}b^{\frac{1}{2}}R_3^2}{\sqrt{b}R_3 - R_2^2} \left[(\sqrt{b}R_3)^{\frac{2s}{s+1}} - R_2^{\frac{4s}{s+1}} \right] \right\} = \\ &= \frac{4}{3}R_1R_1^{\frac{4s}{s+1}} + \frac{4 R_2^3 - R_1^3}{3 R_2^2 - R_1^2} \left[R_2^{\frac{4s}{s+1}} - R_1^{\frac{4s}{s+1}} \right] + \\ &= \frac{\frac{1}{3}b^{\frac{3}{2}} - \frac{4}{3}R_2^3 + b^{\frac{1}{2}}R_3^2}{\sqrt{b}R_3 - R_2^2} \left[(\sqrt{b}R_3)^{\frac{2s}{s+1}} - R_2^{\frac{4s}{s+1}} \right]. \end{aligned}$$

4 MODELLO ANALITICO PER LA PROGETTAZIONE DI MAGAZZINI AUTOMATIZZATI CON ALLOCAZIONE DELLA MERCE PER ZONE DEDICATE E SERVITI DA TRASLOELEVATORI MULTI-SHUTTLE

Il modello descritto di seguito si pone l'obiettivo di permettere il calcolo preliminare del tempo atteso di ciclo per magazzini automatizzati con allocazione della merce per tre zone dedicate e serviti da trasloelevatori multi-shuttle.

Ipotesi:

- si considera una sola scaffalatura servita da un trasloelevatore che viaggia contemporaneamente nelle direzioni verticale e orizzontale;
- i trasloelevatori viaggiano a velocità verticale e orizzontale costante: non è considerata la presenza di accelerazioni;
- i trasloelevatori sono multi-shuttle (twin-shuttle o triple-shuttle): possono trasportare più di una UdC contemporaneamente;
- i trasloelevatori lavorano con cicli combinati modificati;
- la scaffalatura è genericamente rettangolare nel tempo: il tempo necessario al trasloelevatore per raggiungere dal punto di I/O la massima altezza è diverso da quello necessario per raggiungere la massima distanza orizzontale;
- il punto di I/O si trova nell'angolo in basso a sinistra;
- la scaffalatura è suddivisa in 3 zone (A, B e C) con prodotti a differente indice di rotazione;
- equiprobabilità di accesso ai vani all'interno di ogni zona: ogni vano di una certa zona ha la stessa probabilità di essere selezionato per il deposito o il prelievo;
- le richieste di deposito e prelievo sono eseguite secondo un ordine first come first served o FCFS, cioè nell'ordine in cui si presentano.

Grandezze utilizzate:

- v_h → velocità orizzontale;
- v_v → velocità verticale;
- L → lunghezza scaffalatura;
- H → altezza scaffalatura;
- p_a → probabilità che una UdC debba essere depositata o prelevata dalla zona A;
- p_b → probabilità che una UdC debba essere depositata o prelevata dalla zona B;
- p_c → probabilità che una UdC debba essere depositata o prelevata dalla zona C;
- t_a → tempo atteso di viaggio dal punto di I/O a un vano della zona A o viceversa;
- t_b → tempo atteso di viaggio dal punto di I/O a un vano della zona B o viceversa;
- t_c → tempo atteso di viaggio dal punto di I/O a un vano della zona C o viceversa;
- t_{aa} → tempo atteso di viaggio da un vano della zona A a un altro della stessa zona;
- t_{bb} → tempo atteso di viaggio da un vano della zona B a un altro della stessa zona;
- t_{cc} → tempo atteso di viaggio da un vano della zona C a un altro della stessa zona;
- t_{ab} → tempo atteso di viaggio da un vano della zona A a un vano della zona B o viceversa;
- t_{ac} → tempo atteso di viaggio da un vano della zona A a un vano della zona C o viceversa;
- t_{bc} → tempo atteso di viaggio da un vano della zona B a un vano della zona C o viceversa.

Si trasformino le coordinate spaziali in coordinate temporali:

- $t_h = \frac{L}{v_h} \rightarrow$ tempo necessario per raggiungere la colonna più lontana dall'I/O;
- $t_v = \frac{H}{v_v} \rightarrow$ tempo necessario per raggiungere la riga più lontana dall'I/O.

Si definisca il fattore di forma $b = \min \left\{ \frac{t_h}{t_v}, \frac{t_v}{t_h} \right\}$ $0 \leq b \leq 1$. Per comodità e senza perdita di generalità, si assuma che $t_h \leq t_v$ e perciò $b = \frac{t_h}{t_v}$.

Si normalizzi l'area della scaffalatura a uno. In altre parole, il prodotto dell'altezza per la lunghezza in unità temporali sia pari a uno: $h \cdot v = 1$. Perciò, con un fattore di forma pari a b , si richiede che $\frac{h}{v} = b$. Risolvendo rispetto ad h e v , si ottiene che $h = \sqrt{b}$ e $v = \frac{1}{\sqrt{b}}$.

Come visto nel capitolo 3.2.3, si possono avere due diverse configurazioni delle zone:

- configurazione I (Figura 4.3);

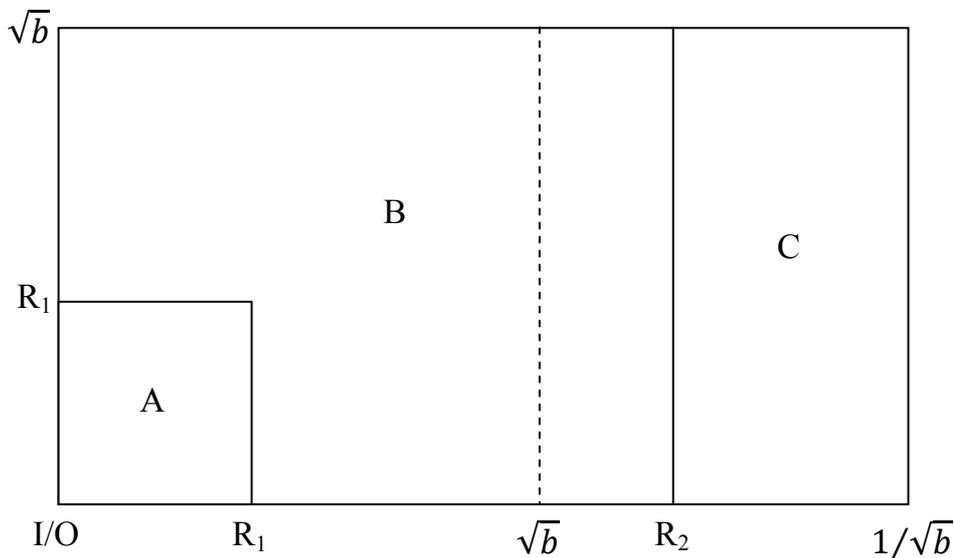


Figura 4.1

- configurazione II (Figura 4.3).

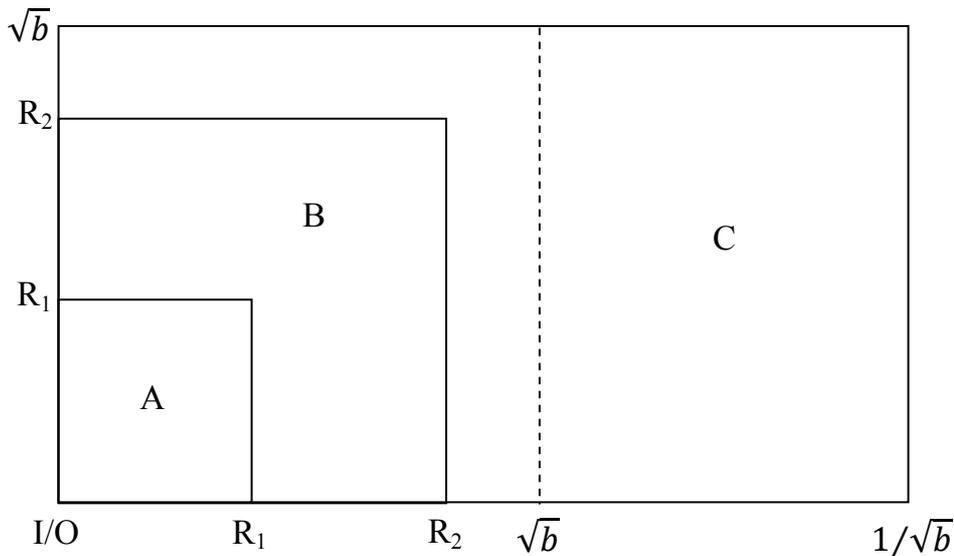


Figura 4.2

4.1 Twin-shuttle

Si consideri una scaffalatura suddivisa in tre zone servita da un trasloelevatore triple-shuttle che effettua cicli MQC o, se non è possibile, QC come descritti nel capitolo 2. Considerata la suddivisione in zone della

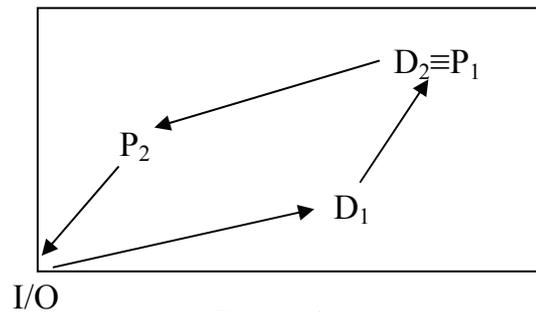


Figura 4.3

scaffalatura e la gestione FCFS, è possibile effettuare cicli MQC solo se il secondo punto di deposito e il primo punto di prelievo si trovano nella stessa zona.

Il tempo atteso di un ciclo $E(T)$ può essere calcolato come

$$E(T) = P(E)E(\text{MQC}) + [1 - P(E)]E(\text{QC})$$

dove

$E = \{\text{il secondo punto di deposito e il primo punto di prelievo di un ciclo si trovano nella stessa zona}\}$.

L'evento E è dato dall'unione di tre eventi:

$$E = E_1 \cup E_2 \cup E_3$$

dove

$E_1 = \{\text{il secondo punto di deposito e il primo punto di prelievo di un ciclo si trovano nella zona A}\},$

$E_2 = \{\text{il secondo punto di deposito e il primo punto di prelievo di un ciclo si trovano nella zona B}\},$

$E_3 = \{\text{il secondo punto di deposito e il primo punto di prelievo di un ciclo si trovano nella zona C}\}.$

Ognuno degli eventi E_1, E_2 ed E_3 è dato dall'intersezione di due eventi:

$$E_1 = E_1' \cap E_1''$$

$$E_2 = E_2' \cap E_2''$$

$$E_3 = E_3' \cap E_3''$$

dove

$E_1' = \{\text{il secondo punto di deposito di un ciclo si trova nella zona A}\},$

$E_1'' = \{\text{il primo punto di prelievo di un ciclo si trova nella zona A}\},$

$E_2' = \{\text{il secondo punto di deposito di un ciclo si trova nella zona B}\},$

$E_2'' = \{\text{il primo punto di prelievo di un ciclo si trova nella zona B}\},$

$E_3' = \{\text{il secondo punto di deposito di un ciclo si trova nella zona C}\},$

$E_3'' = \{\text{il primo punto di prelievo di un ciclo si trova nella zona C}\}.$

Poiché gli eventi di ogni coppia E_i' ed E_i'' sono indipendenti e gli eventi E_1, E_2 ed E_3 sono mutuamente esclusivi, la probabilità dell'evento E può essere calcolata come

$$\begin{aligned} P(E) &= P(E_1 \cup E_2 \cup E_3) = \\ &= P((E_1' \cap E_1'') \cup (E_2' \cap E_2'') \cup (E_3' \cap E_3'')) = \\ &= P(E_1')P(E_1'') + P(E_2')P(E_2'') + P(E_3')P(E_3'') = \\ &= p_a^2 + p_b^2 + p_c^2 \end{aligned}$$

Il tempo atteso di un ciclo $E(T)$ può dunque risulta

$$\begin{aligned} E(T) &= P(E)E(\text{MQC}) + [1 - P(E)]E(\text{QC}) = \\ &= (p_a^2 + p_b^2 + p_c^2)E(\text{MQC}) + [1 - (p_a^2 + p_b^2 + p_c^2)]E(\text{QC}) . \end{aligned}$$

Come già visto nel paragrafo 2.2, il tempo atteso di un ciclo MQC può essere calcolato come

$$E(\text{MQC}) = E(\text{SC}) + 2E(\text{TB}) ,$$

mentre il tempo atteso di un ciclo QC può essere calcolato come

$$E(\text{QC}) = E(\text{SC}) + 3E(\text{TB}) .$$

Il tempo atteso di un SC può essere calcolato come

$$\begin{aligned} E(\text{SC}) &= 2(t_a p_a + t_b p_b + t_c p_c) = \\ &= 2t_a p_a + 2t_b p_b + 2t_c p_c \end{aligned}$$

poiché ogni viaggio può essere da o verso un punto qualsiasi della zona i di durata media t_i con probabilità p_i .

Il tempo atteso di un TB può essere calcolato come

$$E(\text{TB}) = t_{aa} p_a^2 + t_{bb} p_b^2 + t_{cc} p_c^2 + 2t_{ab} p_a p_b + 2t_{ac} p_a p_c + 2t_{bc} p_b p_c$$

poiché ogni viaggio può essere da un punto qualsiasi della zona i a un punto qualsiasi della zona j di durata media t_{ij} con probabilità $p_i p_j$.

4.2 Triple-shuttle

Un trasloelevatore triple-shuttle che opera in una scaffalatura suddivisa in tre zone, per migliorare le prestazioni del sistema può eseguire quattro tipi di ciclo: MSC, MSC', MSC'', STC.

Il ciclo MSC, presentato nel paragrafo 2.2, è il più conveniente ma può essere realizzato solo se il secondo punto di deposito e il primo punto di prelievo si trovano nella stessa zona e il terzo punto di deposito e il secondo punto di prelievo si trovano nella stessa zona.

Se non si verificano le due condizioni per eseguire un ciclo MSC, possono comunque esserci le condizioni per realizzare un ciclo migliore rispetto a un STC:

- se il terzo punto di deposito e il secondo punto di prelievo non si trovano nella stessa zona ma il secondo punto di

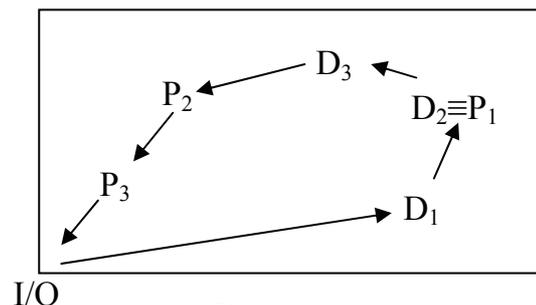


Figura 4.4

deposito e il primo punto di prelievo si trovano nella stessa zona, si può eseguire un ciclo MSC' (Figura 4.4);

- se il secondo punto di deposito e il primo punto di prelievo non si trovano nella stessa zona ma il terzo punto di deposito e il primo punto di prelievo si trovano nella stessa

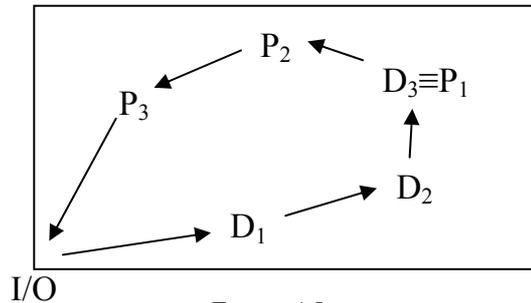


Figura 4.5

zona, si può eseguire un ciclo MSC'' (Figura 4.5).

Se non sussistono neanche le condizioni per eseguire un ciclo MSC' o MSC'', si è costretti a eseguire il ciclo STC, il meno conveniente.

Complessivamente il tempo atteso di un ciclo $E(T)$ può essere calcolato come

$$E(T) = P(E)E(MSC) + P(E')E(MSC') + P(E'')E(MSC'') + \\ + [1 - (P(E) + P(E') + P(E''))]E(STC)$$

dove

$E = \{\text{può essere eseguito un ciclo MSC}\}$,

$E' = \{\text{può essere eseguito un ciclo MSC}'\}$,

$E'' = \{\text{può essere eseguito un ciclo MSC}''\}$.

L'evento E è dato dall'unione di due eventi:

$$E = E_\alpha \cap E_\beta$$

dove

$E_\alpha = \{\text{il secondo punto di deposito e il primo punto di prelievo di un ciclo si trovano nella stessa zona}\}$,

$E_\beta = \{\text{il terzo punto di deposito e il secondo punto di prelievo di un ciclo si trovano nella stessa zona}\}$.

Si noti che E_α è lo stesso evento E del paragrafo 4.2 ed ha perciò la stessa probabilità di accadimento:

$$P(E_\alpha) = p_a^2 + p_b^2 + p_c^2 .$$

Si noti inoltre che $P(E_\beta)$ può essere calcolato con lo stesso procedimento di $P(E)$ del paragrafo 4.2 e presenta perciò lo stesso valore di $P(E_\alpha)$:

$$P(E_\beta) = p_a^2 + p_b^2 + p_c^2 .$$

Poiché gli eventi E_α ed E_β sono indipendenti, la probabilità dell'evento E può essere calcolata come

$$\begin{aligned} P(E) &= P(E_\alpha \cap E_\beta) = \\ &= P(E_\alpha)P(E_\beta) = \\ &= (p_a^2 + p_b^2 + p_c^2)^2 = \\ &= p_a^4 + p_b^4 + p_c^4 + 2p_a^2p_b^2 + 2p_a^2p_c^2 + 2p_b^2p_c^2 \end{aligned}$$

L'evento E' è dato dall'unione di due eventi di cui uno negato:

$$E' = E_\alpha \cap \overline{E_\beta} .$$

Poiché gli eventi E_α ed E_β sono indipendenti, la probabilità dell'evento E' può essere calcolata come

$$\begin{aligned} P(E') &= P(E_\alpha \cap \overline{E_\beta}) = \\ &= P(E_\alpha) (1 - P(E_\beta)) = (p_a^2 + p_b^2 + p_c^2)(1 - p_a^2 - p_b^2 - p_c^2) = \\ &= p_a^2 + p_b^2 + p_c^2 - p_a^4 - p_b^4 - p_c^4 - 2p_a^2p_b^2 - 2p_a^2p_c^2 + \\ &\quad - 2p_b^2p_c^2 . \end{aligned}$$

L'evento E'' è dato dall'unione di due eventi di cui uno negato:

$$E' = E_\gamma \cap \overline{E_\alpha}$$

dove

$E_\gamma = \{\text{il terzo punto di deposito e il primo punto di prelievo di un ciclo si trovano nella stessa zona}\}$.

Si noti inoltre che $P(E_\gamma)$ può essere calcolato con lo stesso procedimento di $P(E)$ del paragrafo 4.2 e presenta perciò lo stesso valore di $P(E_\alpha)$:

$$P(E_\gamma) = p_a^2 + p_b^2 + p_c^2 .$$

Poiché gli eventi E_γ ed E_α sono indipendenti, la probabilità dell'evento E'' può essere calcolata come

$$P(E'') = P(E_\gamma \cap \overline{E_\alpha}) =$$

$$\begin{aligned}
&= P(E_\gamma) (1 - P(E_\beta)) = \\
&= (p_a^2 + p_b^2 + p_c^2)(1 - p_a^2 - p_b^2 - p_c^2) = \\
&= p_a^2 + p_b^2 + p_c^2 - p_a^4 - p_b^4 - p_c^4 - 2p_a^2p_b^2 - 2p_a^2p_c^2 + \\
&\quad - 2p_b^2p_c^2 .
\end{aligned}$$

Il tempo atteso di un ciclo $E(T)$ può dunque risulta

$$\begin{aligned}
E(T) &= P(E)E(MSC) + P(E')E(MSC') + P(E'')E(MSC'') + [1 - \\
&(P(E) + P(E') + P(E''))]E(STC) = \\
&= (p_a^4 + p_b^4 + p_c^4 + 2p_a^2p_b^2 + 2p_a^2p_c^2 + 2p_b^2p_c^2)E(MSC) + \\
&+ (p_a^2 + p_b^2 + p_c^2 - p_a^4 - p_b^4 - p_c^4 - 2p_a^2p_b^2 - 2p_a^2p_c^2 + \\
&- 2p_b^2p_c^2)E(MSC') + (p_a^2 + p_b^2 + p_c^2 - p_a^4 - p_b^4 - p_c^4 + \\
&- 2p_a^2p_b^2 - 2p_a^2p_c^2 - 2p_b^2p_c^2)E(MSC'') + [1 + p_a^4 + p_b^4 + p_c^4 + \\
&+ 2p_a^2p_b^2 + 2p_a^2p_c^2 + 2p_b^2p_c^2 - 2p_a^2 - 2p_b^2 - 2p_c^2]E(STC) .
\end{aligned}$$

Come già visto nel paragrafo 2.2, il tempo atteso di un ciclo MSC può essere calcolato come

$$E(MSC) = E(SC) + 3E(TB) ,$$

mentre il tempo atteso di un ciclo STC può essere calcolato come

$$E(STC) = E(SC) + 5E(TB) .$$

Sia per il ciclo MSC' che per il ciclo MSC'' si può calcolare il tempo atteso di ciclo come

$$\begin{aligned}
E(MSC') &= E(MSC'') = \\
&= E(SC) + 4E(TB) .
\end{aligned}$$

Come già visto al paragrafo 4.1, il tempo atteso di un SC può essere calcolato come

$$E(SC) = 2(t_a p_a + t_b p_b + t_c p_c)$$

mentre il tempo atteso di un TB può essere calcolato come

$$E(TB) = t_{aa}p_a^2 + t_{bb}p_b^2 + t_{cc}p_c^2 + 2t_{ab}p_a p_b + 2t_{ac}p_a p_c + 2t_{bc}p_b p_c .$$

4.3 Calcolo di t_a , t_b , t_c , t_{aa} , t_{bb} , t_{cc} , t_{ab} , t_{ac} e t_{bc}

Si eseguono di seguito i calcoli per la determinazione dei tempi medi di trasferimento dal punto di I/O (t_a , t_b e t_c), dei tempi medi di trasferimento intra-

zona (t_{aa} , t_{bb} e t_{cc}) e dei tempi medi di trasferimento inter-zona (t_{ab} , t_{ac} e t_{bc}) per entrambe le configurazioni illustrate precedentemente.

Si noti che i tempi medi di trasferimento tra il punto di I/O t_a , t_b e t_c sono già stati calcolati nel paragrafo 3.2 dove erano chiamati rispettivamente t_1 , t_2 e t_3 perciò di seguito si riportano solo i risultati ottenuti.

Per quanto riguarda il calcolo di t_{aa} in entrambe le configurazioni e di t_{cc} nella configurazione I, è stato possibile applicare un'estensione del metodo utilizzato da Bozer e White per il calcolo di E(TB) illustrato al paragrafo 1.3.2. Ciò è stato possibile perché le zone considerate presentano una forma quadrata o rettangolare che rende lecita l'affermazione che $|x_1 - x_2| \leq z$ e $|y_1 - y_2| \leq z$ sono due eventi indipendenti.

Il calcolo dei tempi medi di trasferimento rimanenti ha costituito il maggiore ostacolo alla formulazione del modello. Il metodo sviluppato per la loro valutazione è infatti molto oneroso in termini di complessità e di tempo necessario allo sviluppo dei calcoli: non è stato perciò possibile portare a compimento la trattazione. Nel paragrafo 6.1, tuttavia, viene presentato un esempio di tale metodo. Allo scopo di poter ugualmente testare il modello analitico proposto, si è scelto di calcolare i tempi medi di trasferimento rimanenti considerando la distanza euclidea tra ogni coppia di punti (x_1, y_1) e (x_2, y_2) , cioè $d_{euclidea} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$, in sostituzione di $d_{reale} = \max\{|x_1 - x_2|, |y_1 - y_2|\}$. L'utilizzo delle distanze euclidee comporta tuttavia una sistematica sovrastima dei tempi medi di trasferimento la cui entità dovrebbe risultare più elevata all'avvicinarsi a 1 del valore del rapporto di forma b.

4.3.1 Configurazione I

4.3.1.1 Calcolo di t_a nella configurazione I

Il tempo medio di trasferimento dal punto di I/O a un punto della zona A nella configurazione I vale

$$t_a = \frac{2}{3}R_1 .$$

4.3.1.2 Calcolo di t_b nella configurazione I

Il tempo medio di trasferimento dal punto di I/O a un punto della zona B nella configurazione I vale

$$t_b = \frac{b\sqrt{b}-4R_1^3+3\sqrt{b}R_2^2}{6(\sqrt{b}R_2-R_1^2)}.$$

4.3.1.3 Calcolo di t_c nella configurazione I

Il tempo medio di trasferimento dal punto di I/O a un punto della zona C nella configurazione I vale

$$t_c = \frac{R_2+R_1}{2}.$$

4.3.1.4 Calcolo di t_{aa} nella configurazione I

Il tempo medio di trasferimento intra-zona della zona A nella configurazione I può essere calcolato applicando il metodo utilizzato da Bozer e White per il calcolo di $E(TB)$. Di seguito si riportano perciò solamente i calcoli rimandando al paragrafo 1.3 per una descrizione più dettagliata del procedimento.

$$t_{aa} = \int_{-\infty}^{\infty} zf(z)dz$$

$$f(z) = \frac{dF(z)}{dz}$$

$$F(z) = F_x(z) \cdot F_y(z)$$

$$F_y(z) = \int_0^z h_y(r)dr$$

$$h_y(r) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} f_y(v)f_y(v+r) dv$$

$$f_y(v) = \begin{cases} 0 & \text{se } v < 0 \\ \frac{1}{R_1} & \text{se } 0 \leq v \leq R_1 - r \\ 0 & \text{se } v > R_1 - r \end{cases}$$

$$f_y(v+r) = \begin{cases} 0 & \text{se } v < 0 \\ \frac{1}{R_1} & \text{se } 0 \leq v \leq R_1 - r \\ 0 & \text{se } v > R_1 - r \end{cases}$$

$$h_y(r) = 2 \int_0^{R_1-r} \frac{1}{R_1} \frac{1}{R_1} dv = 2 \frac{1}{R_1^2} (R_1 - r)$$

$$F_y(z) = \begin{cases} 0 & \text{se } z < 0 \\ \frac{2z}{R_1} - \frac{z^2}{R_1^2} & \text{se } 0 \leq z \leq R_1 \\ 1 & \text{se } z > R_1 \end{cases}$$

$$F_x(z) = F_y(z) = \begin{cases} 0 & \text{se } z < 0 \\ \frac{2z}{R_1} - \frac{z^2}{R_1^2} & \text{se } 0 \leq z \leq R_1 \\ 1 & \text{se } z > R_1 \end{cases}$$

$$F(z) = \begin{cases} 0 & \text{se } z < 0 \\ \left(\frac{2z}{R_1} - \frac{z^2}{R_1^2}\right)^2 & \text{se } 0 \leq z \leq R_1 \\ 1 & \text{se } z > R_1 \end{cases}$$

$$f(z) = \begin{cases} 0 & \text{se } z < 0 \\ 2 \left(\frac{2z}{R_1} - \frac{z^2}{R_1^2}\right) \left(\frac{2}{R_1} - \frac{2z}{R_1^2}\right) & \text{se } 0 \leq z \leq R_1 \\ 0 & \text{se } z > R_1 \end{cases}$$

$$t_{aa} = \int_0^{R_1} z \left[2 \left(\frac{2z}{R_1} - \frac{z^2}{R_1^2}\right) \left(\frac{2}{R_1} - \frac{2z}{R_1^2}\right) \right] dz = \frac{7}{15} R_1 .$$

4.3.1.5 Calcolo di t_{bb} nella configurazione I

Il tempo medio di trasferimento intra-zona della zona B nella configurazione I approssimato tramite le distanze euclidee può essere calcolato come segue:

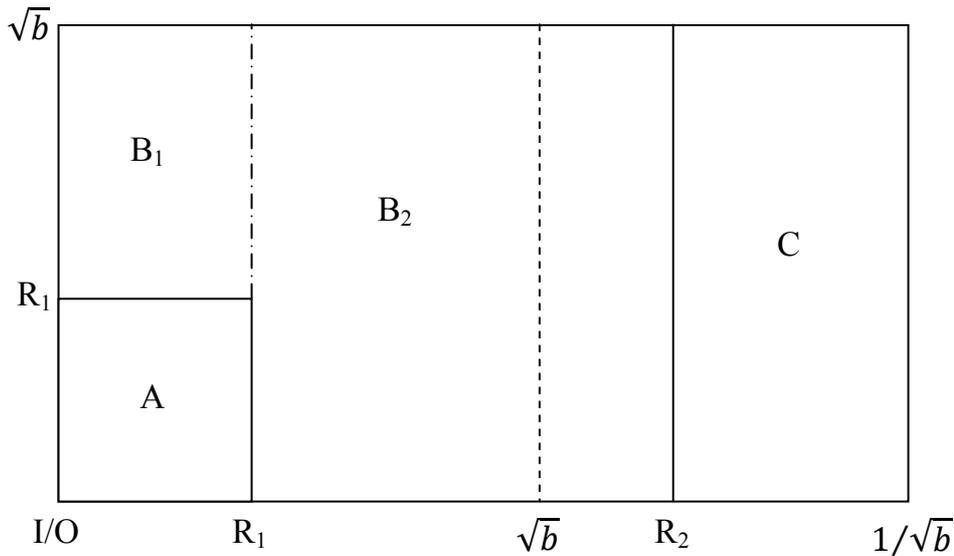


Figura 4.6

$$t_{bb} = \sqrt{\frac{1}{(R_2\sqrt{b}-R_1^2)^2} \cdot (B_1B_1 + B_2B_2 + 2B_1B_2)}$$

dove

$$B_1B_1 = \int_0^{R_1} \int_0^{R_1} \int_{R_1}^{\sqrt{b}} \int_{R_1}^{\sqrt{b}} \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} dy_2 dy_1 dx_2 dx_1 ,$$

$$B_2B_2 = \int_{R_1}^{R_2} \int_{R_1}^{R_2} \int_0^{\sqrt{b}} \int_0^{\sqrt{b}} \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} dy_2 dy_1 dx_2 dx_1 ,$$

$$B_1 B_2 = \int_0^{R_1} \int_{R_1}^{R_2} \int_{R_1}^{\sqrt{b}} \int_0^{\sqrt{b}} \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} dy_2 dy_1 dx_2 dx_1 .$$

Quindi:

$$t_{bb} = \sqrt{\frac{6bR_1^3 R_2 + b^2 R_2^2 - 4b\sqrt{b}R_1^2 R_2 + 6\sqrt{b}R_1^3 R_2^2 - 4\sqrt{b}R_1^2 R_2^3 - 8\sqrt{b}R_1^4 R_2 + 2R_1^6}{6(\sqrt{b}R_2 - R_1^2)^2}} .$$

4.3.1.6 Calcolo di t_{cc} nella configurazione I

Il tempo medio di trasferimento intra-zona della zona C nella configurazione I può essere calcolato applicando il metodo utilizzato da Bozer e White per il calcolo di $E(TB)$. Di seguito si riportano perciò solamente i calcoli rimandando al paragrafo 1.3 per una descrizione più dettagliata del procedimento.

$$t_{cc} = \int_{-\infty}^{\infty} z f(z) dz$$

$$f(z) = \frac{dF(z)}{dz}$$

$$F(z) = F_x(z) \cdot F_y(z)$$

$$F_y(z) = \int_0^z h_y(r) dr$$

$$h_y(r) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} f_y(v) f_y(v+r) dv$$

$$f_y(v) = \begin{cases} 0 & \text{se } v < 0 \\ \frac{1}{\sqrt{b}} & \text{se } 0 \leq v \leq \sqrt{b} - r \\ 0 & \text{se } v > \sqrt{b} - r \end{cases}$$

$$f_y(v+r) = \begin{cases} 0 & \text{se } v < 0 \\ \frac{1}{\sqrt{b}} & \text{se } 0 \leq v \leq \sqrt{b} - r \\ 0 & \text{se } v > \sqrt{b} - r \end{cases}$$

$$h_y(r) = 2 \int_0^{\sqrt{b}-r} \frac{1}{\sqrt{b}} \cdot \frac{1}{\sqrt{b}} dv = 2 \cdot \frac{1}{b} (\sqrt{b} - r)$$

$$F_y(z) = \begin{cases} 0 & \text{se } z < 0 \\ \frac{2z}{\sqrt{b}} - \frac{z^2}{b} & \text{se } 0 \leq z \leq \sqrt{b} \\ 1 & \text{se } z > \sqrt{b} \end{cases}$$

$$F_x(z) = \int_0^z h_x(r) dr$$

$$h_x(r) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} f_x(v) f_x(v+r) dv$$

$$f_x(v) = \begin{cases} 0 & \text{se } v < 0 \\ \frac{1}{\frac{1}{\sqrt{b}} - R_2} & \text{se } 0 \leq v < \frac{1}{\sqrt{b}} - R_2 - r \\ 0 & \text{se } v \geq \frac{1}{\sqrt{b}} - R_2 - r \end{cases}$$

$$f_x(v+r) = \begin{cases} 0 & \text{se } v < 0 \\ \frac{1}{\frac{1}{\sqrt{b}} - R_2} & \text{se } 0 \leq v < \frac{1}{\sqrt{b}} - R_2 - r \\ 0 & \text{se } v \geq \frac{1}{\sqrt{b}} - R_2 - r \end{cases}$$

$$h_x(r) = 2 \int_0^{\frac{1}{\sqrt{b}} - R_2 - r} \frac{1}{\frac{1}{\sqrt{b}} - R_2} \frac{1}{\frac{1}{\sqrt{b}} - R_2} dv = 2 \frac{\frac{1}{\sqrt{b}} - R_2 - r}{\left(\frac{1}{\sqrt{b}} - R_2\right)^2}$$

$$F_x(z) = \begin{cases} 0 & \text{se } z < 0 \\ \frac{2z}{\frac{1}{\sqrt{b}} - R_2} - \frac{z^2}{\left(\frac{1}{\sqrt{b}} - R_2\right)^2} & \text{se } 0 \leq z \leq \frac{1}{\sqrt{b}} - R_2 \\ 1 & \text{se } z > \frac{1}{\sqrt{b}} - R_2 \end{cases}$$

$$\text{Caso 1} \rightarrow \frac{1}{\sqrt{b}} - R_2 > \sqrt{b} \Rightarrow R_2 < \frac{1-b}{\sqrt{b}}$$

$$F(z) = \begin{cases} 0 & \text{se } z < 0 \\ \left[\frac{2z}{\frac{1}{\sqrt{b}} - R_2} - \frac{z^2}{\left(\frac{1}{\sqrt{b}} - R_2\right)^2} \right] \cdot \left(\frac{2z}{\sqrt{b}} - \frac{z^2}{b} \right) & \text{se } 0 \leq z < \sqrt{b} \\ \left(\frac{2z}{\frac{1}{\sqrt{b}} - R_2} - \frac{z^2}{\left(\frac{1}{\sqrt{b}} - R_2\right)^2} \right) \cdot 1 & \text{se } \sqrt{b} \leq z < \frac{1}{\sqrt{b}} - R_2 \\ 1 & \text{se } z \geq \frac{1}{\sqrt{b}} - R_2 \end{cases}$$

$$f(z) = \begin{cases} 0 & \text{se } z < 0 \\ \frac{8z}{1-\sqrt{b}R_2} - \frac{6z^2}{\sqrt{b}-bR_2} - \frac{6z^2}{\sqrt{b}\left(\frac{1}{\sqrt{b}}-R_2\right)^2} + \frac{4z^3}{b\left(\frac{1}{\sqrt{b}}-R_2\right)^2} & \text{se } 0 \leq z < \sqrt{b} \\ \frac{2}{\frac{1}{\sqrt{b}}-R_2} - \frac{2z}{\left(\frac{1}{\sqrt{b}}-R_2\right)^2} & \text{se } \sqrt{b} \leq z < \frac{1}{\sqrt{b}} - R_2 \\ 0 & \text{se } z \geq \frac{1}{\sqrt{b}} - R_2 \end{cases}$$

$$t_{cc} = \int_0^{\sqrt{b}} z \left[\frac{8z}{1-\sqrt{b}R_2} - \frac{6z^2}{\sqrt{b}-bR_2} - \frac{6z^2}{\sqrt{b}\left(\frac{1}{\sqrt{b}}-R_2\right)^2} + \frac{4z^3}{b\left(\frac{1}{\sqrt{b}}-R_2\right)^2} \right] dz +$$

$$+ \int_{\sqrt{b}}^{\frac{1}{\sqrt{b}}-R_2} \left[\frac{2}{\frac{1}{\sqrt{b}}-R_2} - \frac{2z}{\left(\frac{1}{\sqrt{b}}-R_2\right)^2} \right] dz =$$

$$= \frac{5b^2 - b^3 - 5b^2\sqrt{b} + 10 - 30\sqrt{b}R_2 + 30bR_2^2 - 10b\sqrt{b}R_2^3}{30\sqrt{b}(\sqrt{b}R_2 - 1)^2}$$

$$\text{Caso 2} \rightarrow \frac{1}{\sqrt{b}} - R_2 < \sqrt{b} \Rightarrow R_2 > \frac{1-b}{\sqrt{b}}$$

$$F(z) = \begin{cases} 0 & \text{se } z < 0 \\ \left[\frac{2z}{\frac{1}{\sqrt{b}} - R_2} - \frac{z^2}{\left(\frac{1}{\sqrt{b}} - R_2\right)^2} \right] \left(\frac{2z}{\sqrt{b}} - \frac{z^2}{b} \right) & \text{se } 0 \leq z < \frac{1}{\sqrt{b}} - R_2 \\ 1 \left(\frac{2z}{\sqrt{b}} - \frac{z^2}{b} \right) & \text{se } \frac{1}{\sqrt{b}} - R_2 \leq z < \sqrt{b} \\ 1 & \text{se } z \geq \sqrt{b} \end{cases}$$

$$f(z) = \begin{cases} 0 & \text{se } z < 0 \\ \frac{8z}{1-\sqrt{b}R_2} - \frac{6z^2}{\sqrt{b}-bR_2} - \frac{6z^2}{\sqrt{b}\left(\frac{1}{\sqrt{b}}-R_2\right)^2} + \frac{4z^3}{b\left(\frac{1}{\sqrt{b}}-R_2\right)^2} & \text{se } 0 \leq z < \frac{1}{\sqrt{b}} - R_2 \\ \frac{2}{\frac{1}{\sqrt{b}}-R_2} - \frac{2z}{\left(\frac{1}{\sqrt{b}}-R_2\right)^2} & \text{se } \frac{1}{\sqrt{b}} - R_2 \leq z < \sqrt{b} \\ 0 & \text{se } z \geq \sqrt{b} \end{cases}$$

$$t_{cc} = \int_0^{\frac{1}{\sqrt{b}}-R_2} z \left[\frac{8z}{1-\sqrt{b}R_2} - \frac{6z^2}{\sqrt{b}-bR_2} - \frac{6z^2}{\sqrt{b}\left(\frac{1}{\sqrt{b}}-R_2\right)^2} + \frac{4z^3}{b\left(\frac{1}{\sqrt{b}}-R_2\right)^2} \right] dz +$$

$$+ \int_{\frac{1}{\sqrt{b}}-R_2}^{\sqrt{b}} \left[\frac{2}{\frac{1}{\sqrt{b}}-R_2} - \frac{2z}{\left(\frac{1}{\sqrt{b}}-R_2\right)^2} \right] dz =$$

$$= \frac{5b^3R_2^4 - 1 - 20b\sqrt{b}R_2 - 20b^2\sqrt{b}R_2^3 + 30b^2R_2^2 - 20b^3\sqrt{b}R_2 + 10b^4R_2^2 - 10bR_2^2}{30b^2\sqrt{b}(\sqrt{b}R_2 - 1)^2} +$$

$$+ \frac{10b\sqrt{b}R_2^3 - 5b^2R_2^4 + b^2\sqrt{b}R_2^5 + 5\sqrt{b}R_2 + 10b^3 + 5b}{30b^2\sqrt{b}(\sqrt{b}R_2 - 1)^2}.$$

4.3.1.7 Calcolo di t_{ab} nella configurazione I

Il tempo medio di trasferimento inter-zona tra la zona A e la zona B nella configurazione I approssimato tramite le distanze euclidee può essere calcolato come segue:

$$t_{ab} = \sqrt{\frac{1}{R_1^2 \cdot (R_2\sqrt{b} - R_1^2)}} (AB_1 + AB_2)$$

dove

$$AB_1 = \int_0^{R_1} \int_0^{R_1} \int_0^{R_1} \int_0^{\sqrt{b}} \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} dy_2 dy_1 dx_2 dx_1,$$

$$AB_2 = \int_0^{R_1} \int_{R_1}^{R_2} \int_0^{R_1} \int_0^{\sqrt{b}} \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} dy_2 dy_1 dx_2 dx_1.$$

Quindi:

$$t_{ab} = \sqrt{\frac{4\sqrt{b}R_1^2R_2 - 2R_1^4 - 3\sqrt{b}R_1R_2^2 - 3bR_1R_2 + 2\sqrt{b}R_2^3 + 2b\sqrt{b}R_2}{6(\sqrt{b}R_2 - R_1^2)}}.$$

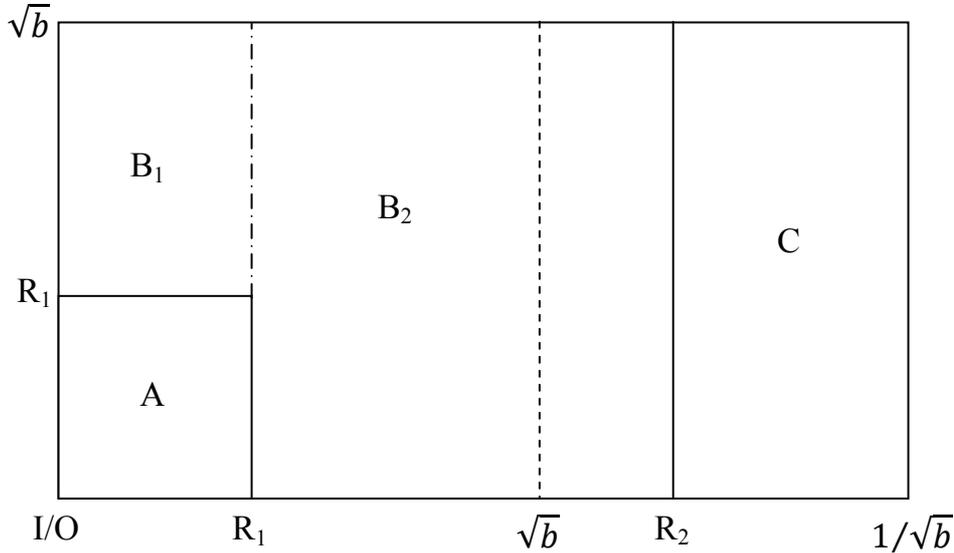


Figura 4.7

4.3.1.8 Calcolo di t_{ac} nella configurazione I

Il tempo medio di trasferimento inter-zona tra la zona A e la zona C nella configurazione I approssimato tramite le distanze euclidee può essere calcolato come segue:

$$t_{ac} = \sqrt{\frac{1}{R_1^2 \cdot \left[\left(\frac{1}{\sqrt{b}} - R_2\right) \cdot \sqrt{b}\right]}} \cdot AC$$

dove

$$AC = \int_0^{R_1} \int_{R_2}^{\frac{1}{\sqrt{b}}} \int_0^{R_1} \int_0^{\sqrt{b}} \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} dy_2 dy_1 dx_2 dx_1.$$

Quindi:

$$t_{ac} = \sqrt{\frac{2b^2\sqrt{b}R_2^3 - 2b + 3b\sqrt{b}R_1 - 3b^2\sqrt{b}R_1R_2^2 + 2b^3\sqrt{b}R_2 - 2b^3 - 3b^3R_1R_2 + 3b^2\sqrt{b}R_1}{6(\sqrt{b}R_2 - R_1^2)}} + \sqrt{\frac{4b^2\sqrt{b}R_1^2R_2 - 4b^2R_1^2}{6(\sqrt{b}R_2 - R_1^2)}}.$$

4.3.1.9 Calcolo di t_{bc} nella configurazione I

Il tempo medio di trasferimento inter-zona tra la zona B e la zona C nella configurazione I approssimato tramite le distanze euclidee può essere calcolato come segue:

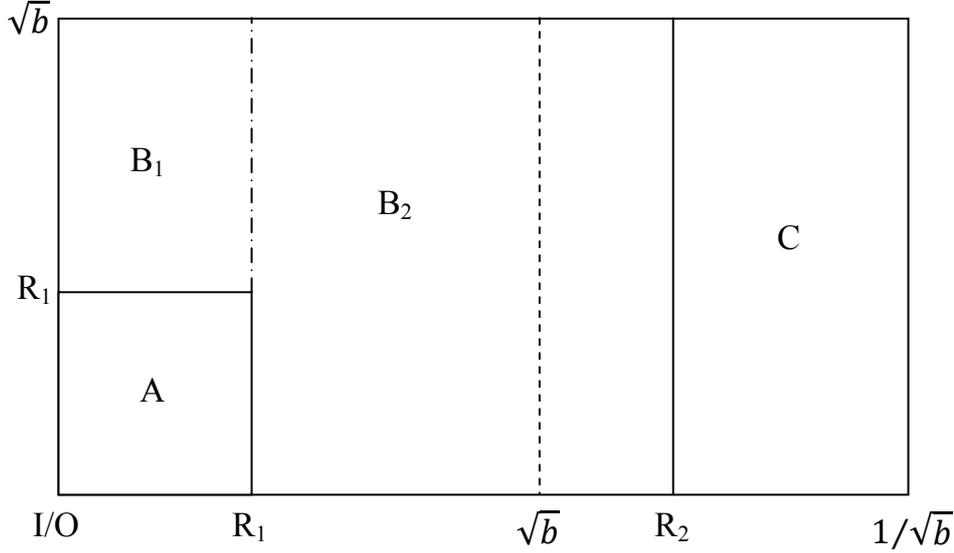


Figura 4.8

$$t_{bc} = \sqrt{\frac{1}{(R_2\sqrt{b}-R_1^2) \cdot \left[\left(\frac{1}{\sqrt{b}}-R_2\right) \cdot \sqrt{b}\right]} (B_1C + B_2C)}$$

dove

$$B_1C = \int_0^{R_1} \int_{R_2}^{\frac{1}{\sqrt{b}}} \int_0^{R_1} \int_0^{\sqrt{b}} \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} dy_2 dy_1 dx_2 dx_1 ,$$

$$B_2C = \int_{R_1}^{R_2} \int_{R_2}^{\frac{1}{\sqrt{b}}} \int_0^{\sqrt{b}} \int_0^{\sqrt{b}} \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} dy_2 dy_1 dx_2 dx_1 .$$

Quindi:

$$t_{bc} = \sqrt{\frac{2b\sqrt{b}R_1^2R_2^3 - 2R_1^2 + 3\sqrt{b}R_1^3 - 3b\sqrt{b}R_1^3R_2^2 + 2b^2\sqrt{b}R_1^2R_2 - 2b^2R_1^2 + 5b\sqrt{b}R_1^3}{6b(\sqrt{b}R_2 - R_1^2)(\sqrt{b}R_2 - 1)}} +$$

$$+ \sqrt{\frac{4b\sqrt{b}R_1^4R_2 - 5b^2R_1^3R_2 - 4bR_1^4 + 2\sqrt{b}R_1 - 2\sqrt{b}R_2 - 2b^2R_1R_2^3 + b^2R_2^4 + 3bR_2^2}{6b(\sqrt{b}R_2 - R_1^2)(\sqrt{b}R_2 - 1)}} +$$

$$+ \sqrt{\frac{3b^2R_1^2R_2^2 - 3bR_1^2 - b^3R_1R_2 + b^3R_2^2 + b^2\sqrt{b}R_1 - b^2\sqrt{b}R_2 - 2b\sqrt{b}R_2^3}{6b(\sqrt{b}R_2 - R_1^2)(\sqrt{b}R_2 - 1)}} .$$

4.3.2 Configurazione II

4.3.2.1 Calcolo di t_a nella configurazione II

Il tempo medio di trasferimento dal punto di I/O a un punto della zona A nella configurazione I vale

$$t_a = \frac{2}{3} R_1 ,$$

come accadeva anche nella configurazione I.

4.3.2.2 Calcolo di t_b nella configurazione II

Il tempo medio di trasferimento dal punto di I/O a un punto della zona B nella configurazione II vale

$$t_b = \frac{2 R_2^3 - R_1^3}{3 R_2^2 - R_1^2} .$$

4.3.2.3 Calcolo di t_c nella configurazione II

Il tempo medio di trasferimento dal punto di I/O a un punto della zona C nella configurazione II vale

$$t_c = \frac{b^2 - 4\sqrt{b}R_2^3 + 3}{6\sqrt{b}(1 - R_2^2)} .$$

4.3.2.4 Calcolo di t_{aa} nella configurazione II

Il tempo medio di trasferimento intra-zona della zona A nella configurazione II è identico al corrispondente nella configurazione I e perciò vale:

$$t_{aa} = \int_0^{R_1} z \left[2 \left(\frac{2z}{R_1} - \frac{z^2}{R_1^2} \right) \left(\frac{2}{R_1} - \frac{2z}{R_1^2} \right) \right] dz = \frac{7}{15} R_1 .$$

4.3.2.5 Calcolo di t_{bb} nella configurazione II

Il tempo medio di trasferimento intra-zona della zona B nella configurazione II approssimato tramite le distanze euclidee può essere calcolato come segue:

$$t_{bb} = \sqrt{\frac{1}{(R_2^2 - R_1^2)^2} (B_1 B_1 + B_2 B_2 + 2B_1 B_2)}$$

dove

$$B_1 B_1 = \int_0^{R_1} \int_0^{R_1} \int_{R_1}^{R_2} \int_{R_1}^{R_2} \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} dy_2 dy_1 dx_2 dx_1 ,$$

$$B_2 B_2 = \int_{R_1}^{R_2} \int_{R_1}^{R_2} \int_0^{R_2} \int_0^{R_2} \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} dy_2 dy_1 dx_2 dx_1 ,$$

$$B_1 B_2 = \int_0^{R_1} \int_{R_1}^{R_2} \int_{R_1}^{R_2} \int_0^{R_2} \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} dy_2 dy_1 dx_2 dx_1 .$$

Quindi:

$$t_{bb} = \sqrt{\frac{(R_2^2 + 3R_1R_2 + R_1^2)(R_2^2 - R_1R_2 + R_1^2)}{3(R_2 + R_1)^2}} .$$

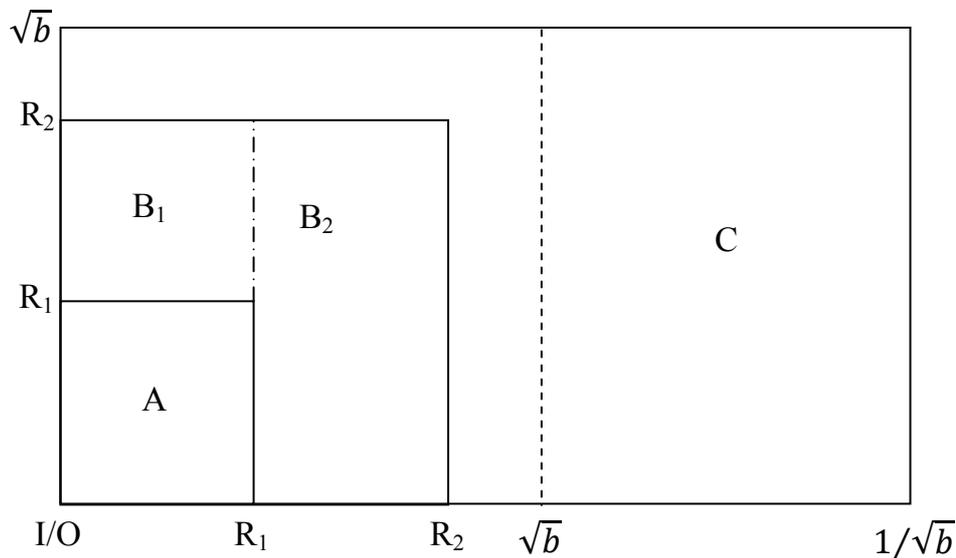


Figura 4.9

4.3.2.6 Calcolo di t_{cc} nella configurazione II

Il tempo medio di trasferimento intra-zona della zona C nella configurazione

II approssimato tramite le distanze euclidee può essere calcolato come segue:

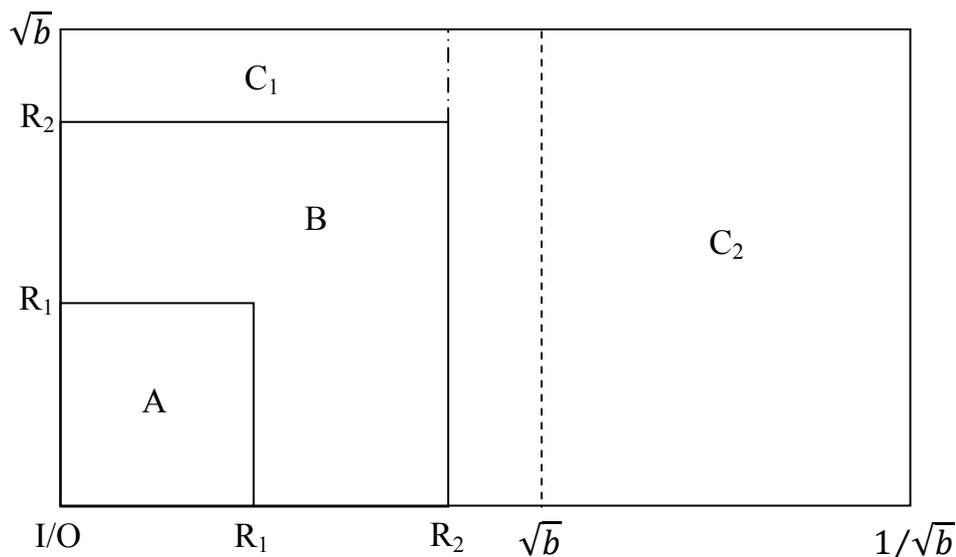


Figura 4.10

$$t_{cc} = \sqrt{\frac{1}{(1-R_2^2)^2} (C_1 C_1 + C_2 C_2 + 2C_1 C_2)}$$

dove

$$C_1 C_1 = \int_0^{R_2} \int_0^{R_2} \int_{R_2}^{\sqrt{b}} \int_{R_2}^{\sqrt{b}} \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} dy_2 dy_1 dx_2 dx_1 ,$$

$$C_2 C_2 = \int_{R_2}^{\frac{1}{\sqrt{b}}} \int_{R_2}^{\frac{1}{\sqrt{b}}} \int_0^{\sqrt{b}} \int_0^{\sqrt{b}} \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} dy_2 dy_1 dx_2 dx_1 ,$$

$$C_1 C_2 = \int_0^{R_2} \int_{R_2}^{\frac{1}{\sqrt{b}}} \int_{R_2}^{\sqrt{b}} \int_0^{\sqrt{b}} \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} dy_2 dy_1 dx_2 dx_1 .$$

Quindi:

$$t_{bb} = \sqrt{\frac{6b\sqrt{b}R_2^3 + b^2 + 1 - 4R_2^2 + 2bR_2^6 - 4b^2R_2^2 - 8bR_2^4 + 6\sqrt{b}R_2^3}{6b(R_2-1)^2(R_2+1)^2}} .$$

4.3.2.7 Calcolo di t_{ab} nella configurazione II

Il tempo medio di trasferimento inter-zona tra la zona A e la zona B nella configurazione II approssimato tramite le distanze euclidee può essere calcolato come segue:

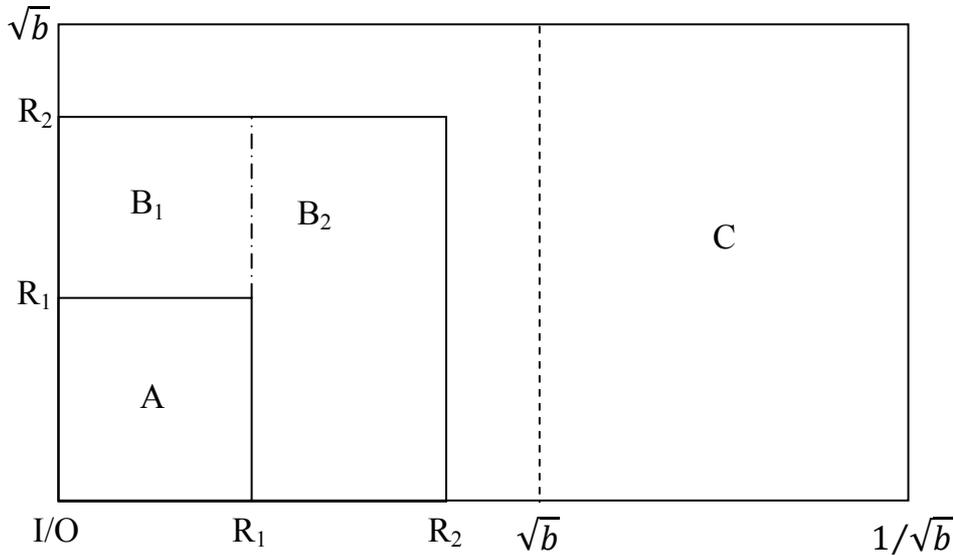


Figura 4.11

$$t_{ab} = \sqrt{\frac{1}{R_1^2(R_2^2 - R_1^2)} (AB_1 + AB_2)}$$

dove

$$AB_1 = \int_0^{R_1} \int_0^{R_1} \int_0^{R_1} \int_{R_1}^{R_2} \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} dy_2 dy_1 dx_2 dx_1 ,$$

$$AB_2 = \int_0^{R_1} \int_{R_1}^{R_2} \int_0^{R_1} \int_0^{R_2} \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} dy_2 dy_1 dx_2 dx_1 .$$

Quindi:

$$t_{ab} = \sqrt{\frac{(2R_2+R_1)(R_2^2-R_1R_2+R_1^2)}{3(R_2+R_1)}} .$$

4.3.2.8 Calcolo di t_{ac} nella configurazione II

Il tempo medio di trasferimento inter-zona tra la zona A e la zona C nella configurazione II approssimato tramite le distanze euclidee può essere calcolato come segue:

$$t_{ac} = \sqrt{\frac{1}{R_1^2 \cdot (1-R_2^2)}} (AC_1 + AC_2)$$

dove

$$AC_1 = \int_0^{R_1} \int_0^{R_2} \int_0^{R_1} \int_0^{\sqrt{b}} \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} dy_2 dy_1 dx_2 dx_1 ,$$

$$AC_2 = \int_0^{R_1} \int_{\frac{1}{\sqrt{b}}}^{R_1} \int_0^{R_1} \int_0^{\sqrt{b}} \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} dy_2 dy_1 dx_2 dx_1 .$$

Quindi:

$$t_{ac} = \sqrt{\frac{4bR_2^4 - 6bR_1R_2^3 + 4bR_1^2R_2^2 - 2 + 3\sqrt{b}R_1 - 2b^2 + 3b\sqrt{b}R_1 - 4bR_1^2}{6b(R_2^2 - 1)}} .$$

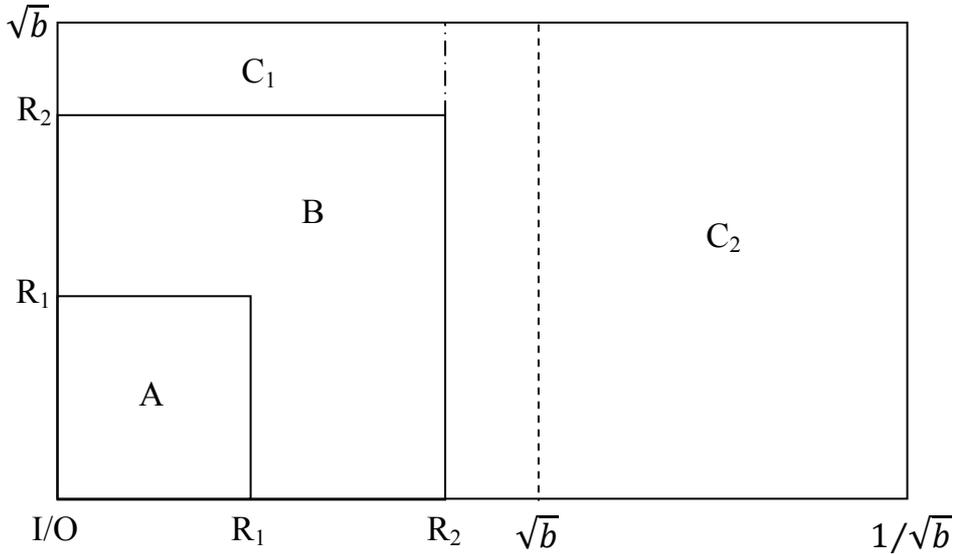


Figura 4.12

4.3.2.9 Calcolo di t_{bc} nella configurazione II

Il tempo medio di trasferimento inter-zona tra la zona B e la zona C nella configurazione II approssimato tramite le distanze euclidee può essere calcolato come segue:

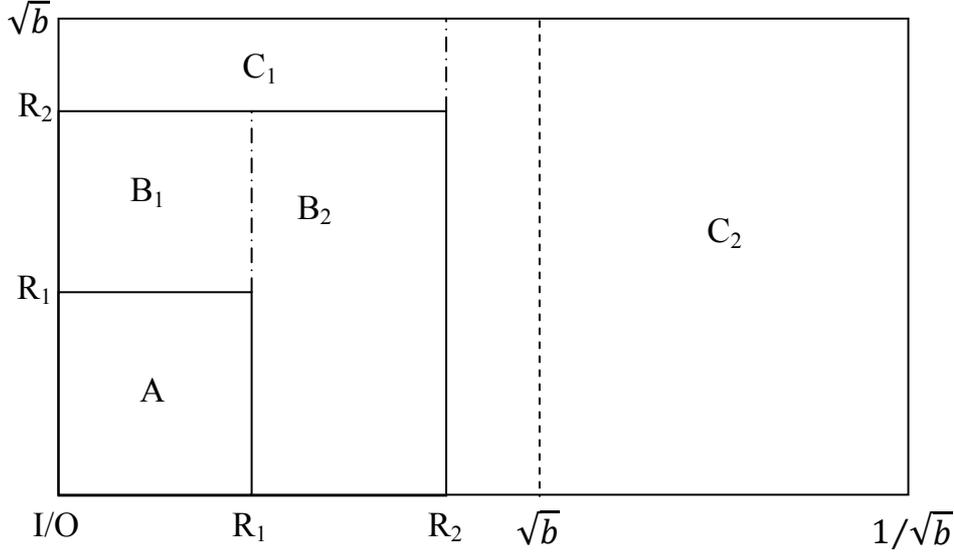


Figura 4.13

$$t_{bc} = \sqrt{\frac{1}{(R_2^2 - R_1^2) \cdot (1 - R_2^2)}} (B_1 C_1 + B_1 C_2 + B_2 C_1 + B_2 C_2)$$

dove

$$B_1 C_1 = \int_0^{R_1} \int_0^{R_2} \int_{R_1}^{R_2} \int_{R_2}^{\sqrt{b}} \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} dy_2 dy_1 dx_2 dx_1,$$

$$B_1 C_2 = \int_0^{R_1} \int_{\frac{1}{\sqrt{b}}}^{\frac{1}{\sqrt{b}}} \int_{R_1}^{R_2} \int_0^{\sqrt{b}} \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} dy_2 dy_1 dx_2 dx_1,$$

$$B_2 C_1 = \int_{R_1}^{R_2} \int_0^{R_2} \int_0^{R_2} \int_{R_2}^{\sqrt{b}} \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} dy_2 dy_1 dx_2 dx_1,$$

$$B_2 C_2 = \int_{R_1}^{R_2} \int_{\frac{1}{\sqrt{b}}}^{\frac{1}{\sqrt{b}}} \int_{R_2}^{R_2} \int_0^{\sqrt{b}} \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} dy_2 dy_1 dx_2 dx_1.$$

Quindi:

$$t_{bc} = \sqrt{\frac{3\sqrt{b}R_1R_2 - 2b^2R_1 - 4bR_1^2R_2 + 2bR_2^5 + 2bR_1R_2^4 - 4bR_1^3 - 4bR_2^3 + 3b\sqrt{b}R_2^2 - 2b^2R_2}{6b(R_2^2 - 1)(R_2 + R_1)}} +$$

$$+ \sqrt{\frac{4bR_1^3R_2^2 - 2bR_1^2R_2^3 + 3b\sqrt{b}R_1^2 + 3b\sqrt{b}R_1R_2 - 4bR_1R_2^2 + 3\sqrt{b}R_2^2 - 2R_2 - 2R_1 + 3\sqrt{b}R_1^2}{6b(R_2^2 - 1)(R_2 + R_1)}}.$$

5 VALIDAZIONE SIMULATIVA DEL MODELLO ANALITICO

Per effettuare una validazione del modello analitico proposto nel capitolo precedente, si è scelto di creare un modello simulativo che generi dati da confrontare con quelli forniti dal modello analitico. Si è scelto di implementare il modello tramite il pacchetto software AutoMod della Brooks Software.

5.1 Modelli simulativi e AutoMod

Un modello simulativo AutoMod è una rappresentazione computerizzata di un sistema di produzione. È possibile utilizzare questa rappresentazione virtuale per testare teorie, risolvere problemi di scheduling e progettare stabilimenti. Il suo utilizzo può inoltre rivelarsi molto utile per sperimentare nuove soluzioni prima di impiegare ingenti capitali nella modifica di un sistema di produzione esistente.

I sistemi di produzione sono costituiti da due tipi di elementi: elementi temporanei che vengono elaborati e poi rimossi dal sistema, come i prodotti, ed elementi permanenti, come gli operatori, i macchinari, i sistemi di movimentazione.

In AutoMod, gli operatori e le macchine che eseguono le lavorazioni, elementi permanenti, sono rappresentati tramite *resource*. Un altro tipo di elemento permanente, i sistemi di movimentazione, sono rappresentati tramite sistemi le cui procedure sono in parte predefinite. A questo scopo esistono sistemi di tipo *Path Mover*, *Conveyor*, *AS/RS*, *Power & Free*, *Bridge Crane*, *Tanks & Pipes*, e *Kinematics*.

In AutoMod, gli elementi temporanei sono rappresentati da *load*. Un *load* rappresenta solitamente un'unità di prodotto o di materiale che si muove attraverso il sistema.

Il rapporto tra *load*, *resource* e sistemi di movimentazione è regolato da un *process system*. Nel *process system*, generato automaticamente all'atto della

creazione di un nuovo modello, si definiscono *load* e *resource*. Nel *process system*, oltre a queste entità fisiche, è vengono creati i *process*, liste di istruzioni che i *load* eseguono durante la simulazione. Per scrivere i *process* si utilizza il linguaggio AutoMod, un linguaggio di programmazione molto simile alla lingua inglese e perciò di semplice apprendimento.

5.2 Modello simulativo implementato

Il modello realizzato permette di simulare un numero variabile di cicli con un trasloelevatore twin-shuttle o triple-shuttle inserendo diversi valori per i parametri (b , R_1 , R_2 , p_a , p_b e p_c) considerati nel modello analitico.

Il modello è formato dal *process system* di nome “simulazione” e dall’*AS/RS system* di nome “magazzino”.

5.2.1 AS/RS system “magazzino”

Di seguito si descrivono le entità inserite nel *AS/RS system* “magazzino”.

5.2.1.1 Rack

Il magazzino prevede un solo corridoio (*aisle*) con 100 vani in verticale e 100 in orizzontale di dimensione 1×1 m. La scaffalatura risulta quindi quadrata rispetto allo spazio e al tempo (poiché la velocità orizzontale del trasloelevatore è impostata uguale a quella verticale) ma la possibilità di simulare scaffalature rettangolari rispetto al tempo è gestita tramite i *process*.

5.2.1.2 P&D Stand

È stato creato un solo *P&D Stand* “pd_IO” in posizione (0,0) che corrisponde al punto di I/O.

5.2.1.3 Zone

È stata creata una sola *Zone* “Zona” che comprende tutto il *rack* per permettere l’indirizzamento parametrico nei *process*.

5.2.1.4 SRM

Sono stati effettuati i seguenti settaggi dei parametri che caratterizzano il trasloelevatore (*SRM*):

- accelerazione orizzontale e verticale $\rightarrow 99999999999$ m/s²;

- decelerazione orizzontale e verticale $\rightarrow 999999999999 \text{ m/s}^2$;
- velocità orizzontale e verticale $\rightarrow 1 \text{ m/s}$;
- creep speed orizzontale e verticale $\rightarrow 1 \text{ m/s}$;
- creep distance orizzontale e verticale $\rightarrow 0 \text{ m/s}$;
- fine position time orizzontale e verticale $\rightarrow 0 \text{ s}$.

Anche in questo caso, il criterio seguito è stato quello di porsi in condizioni il più possibile corrispondenti a quelle del modello teorico; le accelerazioni, per esempio, sono state impostate al valore massimo accettato da AutoMod dato che il modello teorico prevede accelerazioni istantanee.

5.2.1.5 Work list

Sono state create due *Work list*, una in “pd_IO” e una in “Zona” comprendenti entrambe i punti della *zone* “Zona” con l’impostazione *oldest*.

5.2.2 Process system “simulazione”

Di seguito si descrivono le entità inserite nel *process system* “simulazione”.

5.2.2.1 Load

È stato utilizzato un unico tipo di load “L_load” generato in un’unica occorrenza che esegue tutti i *process*. Il primo *process* che il load esegue dopo essere stato generato è “P_inizializza”.

5.2.2.2 Variabili

In Tabella 5.1 sono elencate tutte le variabili utilizzate dal modello, vengono evidenziate anche per esse le principali caratteristiche: il tipo, la dimensione e una breve descrizione del loro utilizzo.

Variabile	Tipo	Dim	Descrizione
V_D1	Integer	2	Coordinate del primo punto di deposito di un ciclo
V_D2	Integer	2	Coordinate del secondo punto di deposito di un ciclo
V_D3	Integer	2	Coordinate del terzo punto di deposito di un ciclo
V_P1	Integer	2	Coordinate del primo punto di prelievo di un ciclo

V_P2	Integer	2	Coordinate del secondo punto di prelievo di un ciclo
V_P3	Integer	2	Coordinate del terzo punto di prelievo di un ciclo
V_R1	Real	1	Valore di R_1
V_R2	Real	1	Valore di R_2
V_b	Real	1	Valore di b
V_conf	Integer	1	Indica se le zone assumono la configurazione I ($V_conf=1$) o II ($V_conf=2$)
V_file_output	FilePTR	1	Puntatore al file di output "Output_simulazione.csv"
V_num_cicli	Integer	1	Numero di cicli da eseguire
V_num_shuttle	Integer	1	Numero di shuttle del trasloelevatore
V_num_vani_vert	Integer	1	Numero di vani in verticale (in orizzontale il numero è fissato a 100)
V_pa	Real	1	Valore di p_a
V_pb	Real	1	Valore di p_b
V_pc	Real	1	Valore di p_c
V_tempo_totale	Real	1	Tempo totale per l'esecuzione dei cicli richiesti
V_vano_R1	Integer	1	Conversione di R_1 in numero di vani
V_vano_R2	Integer	1	Conversione di R_2 in numero di vani
V_zona_B	Integer	1	Indica in quale parte della zona B si troverà il punto di prelievo o deposito che sta per essere assegnato
V_zona_C	Integer	1	Indica in quale parte della zona C si troverà il punto di prelievo o deposito che sta per essere assegnato

V_zona_D1	Integer	1	Indica se il primo punto di deposito di un ciclo si trova nella zona A (V_zona_D1=1), B (V_zona_D1=2) o C (V_zona_D1=3)
V_zona_D2	Integer	1	Indica se il secondo punto di deposito di un ciclo si trova nella zona A (V_zona_D1=1), B (V_zona_D1=2) o C (V_zona_D1=3)
V_zona_D3	Integer	1	Indica se il terzo punto di deposito di un ciclo si trova nella zona A (V_zona_D1=1), B (V_zona_D1=2) o C (V_zona_D1=3)
V_zona_P1	Integer	1	Indica se il primo punto di prelievo di un ciclo si trova nella zona A (V_zona_D1=1), B (V_zona_D1=2) o C (V_zona_D1=3)
V_zona_P2	Integer	1	Indica se il secondo punto di prelievo di un ciclo si trova nella zona A (V_zona_D1=1), B (V_zona_D1=2) o C (V_zona_D1=3)
V_zona_P3	Integer	1	Indica se il terzo punto di prelievo di un ciclo si trova nella zona A (V_zona_D1=1), B (V_zona_D1=2) o C (V_zona_D1=3)
i	Integer	1	Contatore

Tabella 5.1

5.2.2.3 Processi

Di seguito si riporta il codice dei processi e una breve descrizione del loro funzionamento.

P_inizializza

Questo processo è eseguito da L_load quando viene generato e ha lo scopo di verificare l'accettabilità dei valori delle variabili impostate dall'utente, di settare il valore di alcune variabili in base agli input forniti e di indirizzare il *load* al processo successivo appropriato.

Il codice del processo è il seguente:

```
begin

/* Verifica accettabilità valore di V_b */
if V_b <= 0 or V_b > 1 then
    begin
        print "Valore di b errato" to message
        print "La simulazione verrà terminata" to message
        terminate
    end

/* Verifica accettabilità valore di V_R1 */
if V_R1 <= 0 or V_R1 > sqrt(V_b) then
    begin
        print "Valore di R1 errato" to message
        print "La simulazione verrà terminata" to message
        terminate
    end

/* Verifica accettabilità valore di V_R2 */
if V_R2 <= V_R1 or V_R2 > 1/sqrt(V_b) then
    begin
        print "Valore di R2 errato" to message
        print "La simulazione verrà terminata" to message
        terminate
    end

/* Verifica accettabilità valori di V_pa, V_pb e V_pc */
if V_pa*100 + V_pb*100 + V_pc*100 <> 100 then
    begin
        print "Valori di pa, pb e pc errati:", V_pa, V_pb, V_pc,
            to message
        print "La simulazione verrà terminata" to message
        terminate
    end

/* Calcolo valori di V_num_vani_vert, V_vano_R1 e V_vano_R2 */
set V_num_vani_vert to 100 * V_b
set V_vano_R1 to V_R1 * 100 * sqrt(V_b)
set V_vano_R2 to V_R2 * 100 * sqrt(V_b)

/* Apertura file di output */
open "arc/Output_simulazione.csv" for appending save result as
```

```

V_file_output

/* Scelta del processo successivo */
if V_R2 >= sqrt(V_b) then
    begin
        set V_conf to 1
        if V_num_shuttle = 2 then
            send to P_conf1_twin
        else
            if V_num_shuttle = 3 then
                send to P_conf1_triple
            else
                begin
                    print "Numero di shuttle errato" to
                        message
                    print "La simulazione verrà
                        terminata" to message
                    terminate
                end
            end
        end
    end
else
    begin
        set V_conf to 2
        if V_num_shuttle = 2 then
            send to P_conf2_twin
        else
            if V_num_shuttle = 3 then
                send to P_conf2_triple
            else
                begin
                    print "Numero di shuttle errato" to
                        message
                    print "La simulazione verrà
                        terminata" to message
                    terminate
                end
            end
        end
    end
end
end

```

P_conf1_twin

Questo processo esegue i cicli richiesti se la suddivisione in zone corrisponde alla configurazione I definita nel modello analitico e se il trasloelevatore è twin-shuttle.

Il codice del processo è il seguente:

```
begin

    print "Configurazione I, Twin-shuttle" to message
    move into magazzino.pd_IO(1)

    set i to 0
    while i < V_num_cicli do
        begin

            /* Scelta primo punto di deposito D1 */
            set V_zona_D1 to oneof(V_pa:1, V_pb:2, V_pc:3)
            if V_zona_D1 = 1 then
                begin
                    set V_D1(1) to 1 + V_vano_R1 * uniform
                        0.5,0.5
                    set V_D1(2) to 1 + V_vano_R1 * uniform
                        0.5,0.5
                    end
                if V_zona_D1 = 2 then
                    begin
                        set V_zona_B to oneof((V_R1 * (sqrt(V_b) -
                            V_R1)) / (V_R2 * sqrt(V_b) - V_R1 *
                            V_R1):1, ((V_R2 - V_R1) * sqrt(V_b))
                            / (V_R2 * sqrt(V_b) - V_R1 *
                            V_R1):2)
                        if V_zona_B = 1 then
                            begin
                                set V_D1(1) to 1 + V_vano_R1 *
                                    uniform 0.5,0.5
                                set V_D1(2) to V_vano_R1 +
                                    (V_num_vani_vert -
                                    V_vano_R1) * uniform
                                    0.5,0.5
                            end
                        else
                            begin
```

```

set V_D1(1) to V_vano_R1 +
    (V_vano_R2 - V_vano_R1)
    * uniform 0.5,0.5
set V_D1(2) to 1 +
    V_num_vani_vert *
    uniform 0.5,0.5
end
end
if V_zona_D1 = 3 then
begin
set V_D1(1) to V_vano_R2 + (100 -
    V_vano_R2) * uniform 0.5,0.5
set V_D1(2) to 1 + V_num_vani_vert *
    uniform 0.5,0.5
end

/* Scelta secondo punto di deposito D2 */
set V_zona_D2 to oneof(V_pa:1, V_pb:2, V_pc:3)
if V_zona_D2 = 1 then
begin
set V_D2(1) to 1 + V_vano_R1 * uniform
    0.5,0.5
set V_D2(2) to 1 + V_vano_R1 * uniform
    0.5,0.5
end
if V_zona_D2 = 2 then
begin
set V_zona_B to oneof((V_R1 * (sqrt(V_b) -
    V_R1)) / (V_R2 * sqrt(V_b) - V_R1 *
    V_R1):1, ((V_R2 - V_R1) * sqrt(V_b))
    / (V_R2 * sqrt(V_b) - V_R1 *
    V_R1):2)
if V_zona_B = 1 then
begin
set V_D2(1) to 1 + V_vano_R1 *
    uniform 0.5,0.5
set V_D2(2) to V_vano_R1 +
    (V_num_vani_vert -
    V_vano_R1) * uniform
    0.5,0.5
end
else
begin
set V_D2(1) to V_vano_R1 +

```

```

(V_vano_R2 - V_vano_R1)
* uniform 0.5,0.5
set V_D2(2) to 1 +
V_num_vani_vert *
uniform 0.5,0.5
end
end
if V_zona_D2 = 3 then
begin
set V_D2(1) to V_vano_R2 + (100 -
V_vano_R2) * uniform 0.5,0.5
set V_D2(2) to 1 + V_num_vani_vert *
uniform 0.5,0.5
end
end

/* Scelta primo punto di prelievo P1 */
set V_zona_P1 to oneof(V_pa:1, V_pb:2, V_pc:3)
if V_zona_P1 = 1 then
begin
set V_P1(1) to 1 + V_vano_R1 * uniform
0.5,0.5
set V_P1(2) to 1 + V_vano_R1 * uniform
0.5,0.5
end
end
if V_zona_P1 = 2 then
begin
set V_zona_B to oneof((V_R1 * (sqrt(V_b) -
V_R1)) / (V_R2 * sqrt(V_b) - V_R1 *
V_R1):1, ((V_R2 - V_R1) * sqrt(V_b))
/ (V_R2 * sqrt(V_b) - V_R1 *
V_R1):2)
if V_zona_B = 1 then
begin
set V_P1(1) to 1 + V_vano_R1 *
uniform 0.5,0.5
set V_P1(2) to V_vano_R1 +
(V_num_vani_vert -
V_vano_R1) * uniform
0.5,0.5
end
end
else
begin
set V_P1(1) to V_vano_R1 +
(V_vano_R2 - V_vano_R1)

```

```

* uniform 0.5,0.5
set V_P1(2) to 1 +
V_num_vani_vert *
uniform 0.5,0.5
end
end
if V_zona_P1 = 3 then
begin
set V_P1(1) to V_vano_R2 + (100 -
V_vano_R2) * uniform 0.5,0.5
set V_P1(2) to 1 + V_num_vani_vert *
uniform 0.5,0.5
end
end

/* Scelta secondo punto di prelievo P2 */
set V_zona_P2 to oneof(V_pa:1, V_pb:2, V_pc:3)
if V_zona_P2 = 1 then
begin
set V_P2(1) to 1 + V_vano_R1 * uniform
0.5,0.5
set V_P2(2) to 1 + V_vano_R1 * uniform
0.5,0.5
end
end
if V_zona_P2 = 2 then
begin
set V_zona_B to oneof((V_R1 * (sqrt(V_b) -
V_R1)) / (V_R2 * sqrt(V_b) - V_R1 *
V_R1):1, ((V_R2 - V_R1) * sqrt(V_b))
/ (V_R2 * sqrt(V_b) - V_R1 *
V_R1):2)
if V_zona_B = 1 then
begin
set V_P2(1) to 1 + V_vano_R1 *
uniform 0.5,0.5
set V_P2(2) to V_vano_R1 +
(V_num_vani_vert -
V_vano_R1) * uniform
0.5,0.5
end
end
else
begin
set V_P2(1) to V_vano_R1 +
(V_vano_R2 - V_vano_R1)
* uniform 0.5,0.5

```

```

set V_P2(2) to 1 +
    V_num_vani_vert *
    uniform 0.5,0.5
end
end
if V_zona_P2 = 3 then
begin
set V_P2(1) to V_vano_R2 + (100 -
    V_vano_R2) * uniform 0.5,0.5
set V_P2(2) to 1 + V_num_vani_vert *
    uniform 0.5,0.5
end

/* Esecuzione del ciclo QC o MQC */
travel to magazzino.Zona(1,V_D1(1),V_D1(2))
if V_zona_D2 <> V_zona_P1 then
begin
travel to magazzino.Zona(1,V_D2(1),V_D2(2))
print "Ciclo QC" to message
end
else
print "Ciclo MQC" to message
travel to magazzino.Zona(1,V_P1(1),V_P1(2))
travel to magazzino.Zona(1,V_P2(1),V_P2(2))
travel to magazzino.pd_IO(1)

set i to i + 1
end

/* Calcolo del tempo totale e stampa dati su file di output */
set V_tempo_totale to ac
print V_num_shuttle, ";", V_b, ";", V_R1, ";", V_R2, ";",
    V_pa, ";", V_pb, ";", V_pc, ";", V_num_cicli, ";",
    V_tempo_totale, ";", V_tempo_totale/V_num_cicli, ";",
    (V_tempo_totale/V_num_cicli)/4 to V_file_output
terminate
end

```

P_conf2_twin

Questo processo esegue i cicli richiesti se la suddivisione in zone corrisponde alla configurazione II definita nel modello analitico e se il trasloelevatore è twin-shuttle.

Il codice del processo è il seguente:

```
begin

    print "Configurazione II, Twin-shuttle" to message
    move into magazzino.pd_IO(1)

    set i to 0
    while i < V_num_cicli do
        begin

            /* Scelta primo punto di deposito D1 */
            set V_zona_D1 to oneof(V_pa:1, V_pb:2, V_pc:3)
            if V_zona_D1 = 1 then
                begin
                    set V_D1(1) to 1 + V_vano_R1 * uniform
                        0.5,0.5
                    set V_D1(2) to 1 + V_vano_R1 * uniform
                        0.5,0.5
                end
            if V_zona_D1 = 2 then
                begin
                    set V_zona_B to oneof((V_R1 * (V_R2 -
                        V_R1)) / (V_R2 * V_R2 - V_R1 *
                        V_R1):1, ((V_R2 - V_R1) * V_R2) /
                        (V_R2 * V_R2 - V_R1 * V_R1):2)
                    if V_zona_B = 1 then
                        begin
                            set V_D1(1) to 1 + V_vano_R1 *
                                uniform 0.5,0.5
                            set V_D1(2) to V_vano_R1 +
                                (V_vano_R2 - V_vano_R1)
                                * uniform 0.5,0.5
                        end
                    else
                        begin
                            set V_D1(1) to V_vano_R1 +
```

```

(V_vano_R2 - V_vano_R1)
* uniform 0.5,0.5
set V_D1(2) to 1 + V_vano_R2 *
uniform 0.5,0.5
end
end
if V_zona_D1 = 3 then
begin
set V_zona_C to oneof((V_R2 * (sqrt(V_b) -
V_R2)) / (1 - V_R2 * V_R2):1, (((1 /
sqrt(V_b)) - V_R2) * sqrt(V_b)) / (1
- V_R2 * V_R2):2)
if V_zona_C = 1 then
begin
set V_D1(1) to 1 + V_vano_R2 *
uniform 0.5,0.5
set V_D1(2) to V_vano_R2 +
(sqrt(V_b) - V_vano_R2)
* uniform 0.5,0.5
end
else
begin
set V_D1(1) to V_vano_R2 + ((1
/ sqrt(V_b)) -
V_vano_R2) * uniform
0.5,0.5
set V_D1(2) to 1 + sqrt(V_b) *
uniform 0.5,0.5
end
end
end

/* Scelta secondo punto di deposito D2 */
set V_zona_D2 to oneof(V_pa:1, V_pb:2, V_pc:3)
if V_zona_D2 = 1 then
begin
set V_D2(1) to 1 + V_vano_R1 * uniform
0.5,0.5
set V_D2(2) to 1 + V_vano_R1 * uniform
0.5,0.5
end
end
if V_zona_D2 = 2 then
begin
set V_zona_B to oneof((V_R1 * (V_R2 -
V_R1)) / (V_R2 * V_R2 - V_R1 *

```

```

V_R1):1, ((V_R2 - V_R1) * V_R2) /
(V_R2 * V_R2 - V_R1 * V_R1):2)
if V_zona_B = 1 then
begin
set V_D2(1) to 1 + V_vano_R1 *
uniform 0.5,0.5
set V_D2(2) to V_vano_R1 +
(V_vano_R2 - V_vano_R1)
* uniform 0.5,0.5
end
else
begin
set V_D2(1) to V_vano_R1 +
(V_vano_R2 - V_vano_R1)
* uniform 0.5,0.5
set V_D2(2) to 1 + V_vano_R2 *
uniform 0.5,0.5
end
end
if V_zona_D2 = 3 then
begin
set V_zona_C to oneof((V_R2 * (sqrt(V_b) -
V_R2)) / (1 - V_R2 * V_R2):1, (((1 /
sqrt(V_b)) - V_R2) * sqrt(V_b)) / (1
- V_R2 * V_R2):2)
if V_zona_C = 1 then
begin
set V_D2(1) to 1 + V_vano_R2 *
uniform 0.5,0.5
set V_D2(2) to V_vano_R2 +
(sqrt(V_b) - V_vano_R2)
* uniform 0.5,0.5
end
else
begin
set V_D2(1) to V_vano_R2 + ((1
/ sqrt(V_b)) -
V_vano_R2) * uniform
0.5,0.5
set V_D2(2) to 1 + sqrt(V_b) *
uniform 0.5,0.5
end
end
end

```

```

/* Scelta primo punto di prelievo P1 */
set V_zona_P1 to oneof(V_pa:1, V_pb:2, V_pc:3)
if V_zona_P1 = 1 then
  begin
    set V_P1(1) to 1 + V_vano_R1 * uniform
      0.5,0.5
    set V_P1(2) to 1 + V_vano_R1 * uniform
      0.5,0.5
  end
if V_zona_P1 = 2 then
  begin
    set V_zona_B to oneof((V_R1 * (V_R2 -
      V_R1)) / (V_R2 * V_R2 - V_R1 *
      V_R1):1, ((V_R2 - V_R1) * V_R2) /
      (V_R2 * V_R2 - V_R1 * V_R1):2)
    if V_zona_B = 1 then
      begin
        set V_P1(1) to 1 + V_vano_R1 *
          uniform 0.5,0.5
        set V_P1(2) to V_vano_R1 +
          (V_vano_R2 - V_vano_R1)
          * uniform 0.5,0.5
      end
    else
      begin
        set V_P1(1) to V_vano_R1 +
          (V_vano_R2 - V_vano_R1)
          * uniform 0.5,0.5
        set V_P1(2) to 1 + V_vano_R2 *
          uniform 0.5,0.5
      end
    end
  end
if V_zona_P1 = 3 then
  begin
    set V_zona_C to oneof((V_R2 * (sqrt(V_b) -
      V_R2)) / (1 - V_R2 * V_R2):1, (((1 /
      sqrt(V_b)) - V_R2) * sqrt(V_b)) / (1
      - V_R2 * V_R2):2)
    if V_zona_C = 1 then
      begin
        set V_P1(1) to 1 + V_vano_R2 *
          uniform 0.5,0.5
        set V_P1(2) to V_vano_R2 +
          (sqrt(V_b) - V_vano_R2)

```

```

* uniform 0.5,0.5
end
else
begin
set V_P1(1) to V_vano_R2 + ((1
/ sqrt(V_b)) -
V_vano_R2) * uniform
0.5,0.5
set V_P1(2) to 1 + sqrt(V_b) *
uniform 0.5,0.5
end
end

/* Scelta secondo punto di prelievo D2 */
set V_zona_P2 to oneof(V_pa:1, V_pb:2, V_pc:3)
if V_zona_P2 = 1 then
begin
set V_P2(1) to 1 + V_vano_R1 * uniform
0.5,0.5
set V_P2(2) to 1 + V_vano_R1 * uniform
0.5,0.5
end
if V_zona_P2 = 2 then
begin
set V_zona_B to oneof((V_R1 * (V_R2 -
V_R1)) / (V_R2 * V_R2 - V_R1 *
V_R1):1, ((V_R2 - V_R1) * V_R2) /
(V_R2 * V_R2 - V_R1 * V_R1):2)
if V_zona_B = 1 then
begin
set V_P2(1) to 1 + V_vano_R1 *
uniform 0.5,0.5
set V_P2(2) to V_vano_R1 +
(V_vano_R2 - V_vano_R1)
* uniform 0.5,0.5
end
else
begin
set V_P2(1) to V_vano_R1 +
(V_vano_R2 - V_vano_R1)
* uniform 0.5,0.5
set V_P2(2) to 1 + V_vano_R2 *
uniform 0.5,0.5
end
end
end

```

```

        end
    if V_zona_P2 = 3 then
        begin
            set V_zona_C to oneof((V_R2 * (sqrt(V_b) -
                V_R2)) / (1 - V_R2 * V_R2):1, ((1 /
                sqrt(V_b)) - V_R2) * sqrt(V_b)) / (1
                - V_R2 * V_R2):2)
            if V_zona_C = 1 then
                begin
                    set V_P2(1) to 1 + V_vano_R2 *
                        uniform 0.5,0.5
                    set V_P2(2) to V_vano_R2 +
                        (sqrt(V_b) - V_vano_R2)
                        * uniform 0.5,0.5
                end
            else
                begin
                    set V_P2(1) to V_vano_R2 + ((1
                        / sqrt(V_b)) -
                        V_vano_R2) * uniform
                        0.5,0.5
                    set V_P2(2) to 1 + sqrt(V_b) *
                        uniform 0.5,0.5
                end
            end
        end
    end

    /* Esecuzione del ciclo QC o MQC */
    travel to magazzino.Zona(1,V_D1(1),V_D1(2))
    if V_zona_D2 <> V_zona_P1 then
        begin
            travel to magazzino.Zona(1,V_D2(1),V_D2(2))
            print "Ciclo QC" to message
        end
    else
        print "Ciclo MQC" to message
        travel to magazzino.Zona(1,V_P1(1),V_P1(2))
        travel to magazzino.Zona(1,V_P2(1),V_P2(2))
        travel to magazzino.pd_IO(1)

        set i to i + 1
    end

    /* Calcolo del tempo totale e stampa dati su file di output */
    set V_tempo_totale to ac

```

```

print V_num_shuttle, ";", V_b, ";", V_R1, ";", V_R2, ";",
      V_pa, ";", V_pb, ";", V_pc, ";", V_num_cicli, ";",
      V_tempo_totale, ";", V_tempo_totale/V_num_cicli, ";",
      (V_tempo_totale/V_num_cicli)/4 to V_file_output
terminate
end

```

P_conf1_triple

Questo processo esegue i cicli richiesti se la suddivisione in zone corrisponde alla configurazione I definita nel modello analitico e se il trasloelevatore è triple-shuttle.

Il codice del processo è il seguente:

```

begin

print "Configurazione I, Triple-shuttle" to message
move into magazzino.pd_IO(1)

set i to 0
while i < V_num_cicli do
begin

/* Scelta primo punto di deposito D1 */
set V_zona_D1 to oneof(V_pa:1, V_pb:2, V_pc:3)
if V_zona_D1 = 1 then
begin
set V_D1(1) to 1 + V_vano_R1 * uniform
0.5,0.5
set V_D1(2) to 1 + V_vano_R1 * uniform
0.5,0.5
end
if V_zona_D1 = 2 then
begin
set V_zona_B to oneof((V_R1 * (sqrt(V_b) -
V_R1)) / (V_R2 * sqrt(V_b) - V_R1 *
V_R1):1, ((V_R2 - V_R1) * sqrt(V_b))
/ (V_R2 * sqrt(V_b) - V_R1 *
V_R1):2)
if V_zona_B = 1 then
begin
set V_D1(1) to 1 + V_vano_R1 *
uniform 0.5,0.5
set V_D1(2) to V_vano_R1 +

```

```

(V_num_vani_vert -
V_vano_R1) * uniform
0.5,0.5
end
else
begin
set V_D1(1) to V_vano_R1 +
(V_vano_R2 - V_vano_R1)
* uniform 0.5,0.5
set V_D1(2) to 1 +
V_num_vani_vert *
uniform 0.5,0.5
end
end
if V_zona_D1 = 3 then
begin
set V_D1(1) to V_vano_R2 + (100 -
V_vano_R2) * uniform 0.5,0.5
set V_D1(2) to 1 + V_num_vani_vert *
uniform 0.5,0.5
end

/* Scelta secondo punto di deposito D2 */
set V_zona_D2 to oneof(V_pa:1, V_pb:2, V_pc:3)
if V_zona_D2 = 1 then
begin
set V_D2(1) to 1 + V_vano_R1 * uniform
0.5,0.5
set V_D2(2) to 1 + V_vano_R1 * uniform
0.5,0.5
end
if V_zona_D2 = 2 then
begin
set V_zona_B to oneof((V_R1 * (sqrt(V_b) -
V_R1) / (V_R2 * sqrt(V_b) - V_R1 *
V_R1):1, ((V_R2 - V_R1) * sqrt(V_b))
/ (V_R2 * sqrt(V_b) - V_R1 *
V_R1):2)
if V_zona_B = 1 then
begin
set V_D2(1) to 1 + V_vano_R1 *
uniform 0.5,0.5
set V_D2(2) to V_vano_R1 +
(V_num_vani_vert -

```

```

                                V_vano_R1) * uniform
                                0.5,0.5
                                end
                                else
                                begin
                                set V_D2(1) to V_vano_R1 +
                                (V_vano_R2 - V_vano_R1)
                                * uniform 0.5,0.5
                                set V_D2(2) to 1 +
                                V_num_vani_vert *
                                uniform 0.5,0.5
                                end
                                end
                                if V_zona_D2 = 3 then
                                begin
                                set V_D2(1) to V_vano_R2 + (100 -
                                V_vano_R2) * uniform 0.5,0.5
                                set V_D2(2) to 1 + V_num_vani_vert *
                                uniform 0.5,0.5
                                end
                                end

                                /* Scelta terzo punto di deposito D3 */
                                set V_zona_D3 to oneof(V_pa:1, V_pb:2, V_pc:3)
                                if V_zona_D3 = 1 then
                                begin
                                set V_D3(1) to 1 + V_vano_R1 * uniform
                                0.5,0.5
                                set V_D3(2) to 1 + V_vano_R1 * uniform
                                0.5,0.5
                                end
                                end
                                if V_zona_D3 = 2 then
                                begin
                                set V_zona_B to oneof((V_R1 * (sqrt(V_b) -
                                V_R1)) / (V_R2 * sqrt(V_b) - V_R1 *
                                V_R1):1, ((V_R2 - V_R1) * sqrt(V_b))
                                / (V_R2 * sqrt(V_b) - V_R1 *
                                V_R1):2)
                                if V_zona_B = 1 then
                                begin
                                set V_D3(1) to 1 + V_vano_R1 *
                                uniform 0.5,0.5
                                set V_D3(2) to V_vano_R1 +
                                (V_num_vani_vert -
                                V_vano_R1) * uniform

```

```

                                0.5,0.5
                                end
                                else
                                begin
                                set V_D3(1) to V_vano_R1 +
                                    (V_vano_R2 - V_vano_R1)
                                    * uniform 0.5,0.5
                                set V_D3(2) to 1 +
                                    V_num_vani_vert *
                                    uniform 0.5,0.5
                                end
                                end
                                if V_zona_D3 = 3 then
                                begin
                                set V_D3(1) to V_vano_R2 + (100 -
                                    V_vano_R2) * uniform 0.5,0.5
                                set V_D3(2) to 1 + V_num_vani_vert *
                                    uniform 0.5,0.5
                                end
                                end

/* Scelta primo punto di prelievo P1 */
set V_zona_P1 to oneof(V_pa:1, V_pb:2, V_pc:3)
if V_zona_P1 = 1 then
begin
set V_P1(1) to 1 + V_vano_R1 * uniform
0.5,0.5
set V_P1(2) to 1 + V_vano_R1 * uniform
0.5,0.5
end
end
if V_zona_P1 = 2 then
begin
set V_zona_B to oneof((V_R1 * (sqrt(V_b) -
V_R1)) / (V_R2 * sqrt(V_b) - V_R1 *
V_R1):1, ((V_R2 - V_R1) * sqrt(V_b))
/ (V_R2 * sqrt(V_b) - V_R1 *
V_R1):2)
if V_zona_B = 1 then
begin
set V_P1(1) to 1 + V_vano_R1 *
uniform 0.5,0.5
set V_P1(2) to V_vano_R1 +
(V_num_vani_vert -
V_vano_R1) * uniform
0.5,0.5

```

```

end
else
begin
set V_P1(1) to V_vano_R1 +
(V_vano_R2 - V_vano_R1)
* uniform 0.5,0.5
set V_P1(2) to 1 +
V_num_vani_vert *
uniform 0.5,0.5
end
end
if V_zona_P1 = 3 then
begin
set V_P1(1) to V_vano_R2 + (100 -
V_vano_R2) * uniform 0.5,0.5
set V_P1(2) to 1 + V_num_vani_vert *
uniform 0.5,0.5
end
end

/* Scelta secondo punto di prelievo P2 */
set V_zona_P2 to oneof(V_pa:1, V_pb:2, V_pc:3)
if V_zona_P2 = 1 then
begin
set V_P2(1) to 1 + V_vano_R1 * uniform
0.5,0.5
set V_P2(2) to 1 + V_vano_R1 * uniform
0.5,0.5
end
end
if V_zona_P2 = 2 then
begin
set V_zona_B to oneof((V_R1 * (sqrt(V_b) -
V_R1)) / (V_R2 * sqrt(V_b) - V_R1 *
V_R1):1, ((V_R2 - V_R1) * sqrt(V_b))
/ (V_R2 * sqrt(V_b) - V_R1 *
V_R1):2)
if V_zona_B = 1 then
begin
set V_P2(1) to 1 + V_vano_R1 *
uniform 0.5,0.5
set V_P2(2) to V_vano_R1 +
(V_num_vani_vert -
V_vano_R1) * uniform
0.5,0.5
end
end
end
end

```

```

else
    begin
        begin
            set V_P2(1) to V_vano_R1 +
                (V_vano_R2 - V_vano_R1)
                * uniform 0.5,0.5
            set V_P2(2) to 1 +
                V_num_vani_vert *
                uniform 0.5,0.5
        end
    end
    if V_zona_P2 = 3 then
        begin
            set V_P2(1) to V_vano_R2 + (100 -
                V_vano_R2) * uniform 0.5,0.5
            set V_P2(2) to 1 + V_num_vani_vert *
                uniform 0.5,0.5
        end
    end

    /* Scelta terzo punto di prelievo P3 */
    set V_zona_P3 to oneof(V_pa:1, V_pb:2, V_pc:3)
    if V_zona_P3 = 1 then
        begin
            set V_P3(1) to 1 + V_vano_R1 * uniform
                0.5,0.5
            set V_P3(2) to 1 + V_vano_R1 * uniform
                0.5,0.5
        end
    end
    if V_zona_P3 = 2 then
        begin
            set V_zona_B to oneof((V_R1 * (sqrt(V_b) -
                V_R1)) / (V_R2 * sqrt(V_b) - V_R1 *
                V_R1):1, ((V_R2 - V_R1) * sqrt(V_b))
                / (V_R2 * sqrt(V_b) - V_R1 *
                V_R1):2)
            if V_zona_B = 1 then
                begin
                    set V_P3(1) to 1 + V_vano_R1 *
                        uniform 0.5,0.5
                    set V_P3(2) to V_vano_R1 +
                        (V_num_vani_vert -
                        V_vano_R1) * uniform
                        0.5,0.5
                end
            end
        end
    end
else

```

```

begin
    set V_P3(1) to V_vano_R1 +
        (V_vano_R2 - V_vano_R1)
        * uniform 0.5,0.5
    set V_P3(2) to 1 +
        V_num_vani_vert *
        uniform 0.5,0.5
end

end

if V_zona_P3 = 3 then
begin
    set V_P3(1) to V_vano_R2 + (100 -
        V_vano_R2) * uniform 0.5,0.5
    set V_P3(2) to 1 + V_num_vani_vert *
        uniform 0.5,0.5
end

end

/* Esecuzione del ciclo STC, MSC', MSC'', MSC */
travel to magazzino.Zona(1,V_D1(1),V_D1(2))
if V_zona_D2 = V_zona_P1 then
begin
    travel to magazzino.Zona(1,V_P1(1),V_P1(2))
    if V_zona_D3 = V_zona_P2 then
begin
        travel to
            magazzino.Zona(1,V_P2(1)
                ),V_P2(2))
        travel to
            magazzino.Zona(1,V_P3(1)
                ),V_P3(2))
        print "Ciclo MSC" to message
    end
else
begin
        travel to
            magazzino.Zona(1,V_D3(1)
                ),V_D3(2))
        travel to
            magazzino.Zona(1,V_P2(1)
                ),V_P2(2))
        travel to
            magazzino.Zona(1,V_P3(1)
                ),V_P3(2))
        print "Ciclo MSC'" to message
    end
end

```

```

end
end
else
begin
travel to magazzino.Zona(1,V_D2(1),V_D2(2))
if V_zona_D3 = V_zona_P1 then
begin
travel to
magazzino.Zona(1,V_P1(1)
),V_P1(2))
travel to
magazzino.Zona(1,V_P2(1)
),V_P2(2))
travel to
magazzino.Zona(1,V_P3(1)
),V_P3(2))
print "Ciclo MSC'" to message
end
else
begin
travel to
magazzino.Zona(1,V_D3(1)
),V_D3(2))
travel to
magazzino.Zona(1,V_P1(1)
),V_P1(2))
travel to
magazzino.Zona(1,V_P2(1)
),V_P2(2))
travel to
magazzino.Zona(1,V_P3(1)
),V_P3(2))
print "Ciclo STC'" to message
end
end
end
travel to magazzino.pd_IO(1)

set i to i + 1
end

/* Calcolo del tempo totale e stampa dati su file di output */
set V_tempo_totale to ac
print V_num_shuttle, ";", V_b, ";", V_R1, ";", V_R2, ";",
V_pa, ";", V_pb, ";", V_pc, ";", V_num_cicli, ";",

```

```

        V_tempo_totale, ";", V_tempo_totale/V_num_cicli, ";",
        (V_tempo_totale/V_num_cicli)/6 to V_file_output
    terminate
end

```

P_conf2_triple

Questo processo esegue i cicli richiesti se la suddivisione in zone corrisponde alla configurazione II definita nel modello analitico e se il trasloelevatore è triple-shuttle.

Il codice del processo è il seguente:

```

begin

    print "Configurazione II, Triple-shuttle" to message
    move into magazzino.pd_IO(1)

    set i to 0
    while i < V_num_cicli do
        begin

            /* Scelta primo punto di deposito D1 */
            set V_zona_D1 to oneof(V_pa:1, V_pb:2, V_pc:3)
            if V_zona_D1 = 1 then
                begin
                    set V_D1(1) to 1 + V_vano_R1 * uniform
                        0.5,0.5
                    set V_D1(2) to 1 + V_vano_R1 * uniform
                        0.5,0.5
                end
            if V_zona_D1 = 2 then
                begin
                    set V_zona_B to oneof((V_R1 * (V_R2 -
                        V_R1)) / (V_R2 * V_R2 - V_R1 *
                        V_R1):1, ((V_R2 - V_R1) * V_R2) /
                        (V_R2 * V_R2 - V_R1 * V_R1):2)
                    if V_zona_B = 1 then
                        begin
                            set V_D1(1) to 1 + V_vano_R1 *
                                uniform 0.5,0.5
                            set V_D1(2) to V_vano_R1 +
                                (V_vano_R2 - V_vano_R1)
                                * uniform 0.5,0.5
                        end
                    end
                end
            end
        end
        i + 1
    end
end

```

```

else
    begin
        begin
            set V_D1(1) to V_vano_R1 +
                (V_vano_R2 - V_vano_R1)
                * uniform 0.5,0.5
            set V_D1(2) to 1 + V_vano_R2 *
                uniform 0.5,0.5
        end
    end
end
if V_zona_D1 = 3 then
    begin
        set V_zona_C to oneof((V_R2 * (sqrt(V_b) -
            V_R2)) / (1 - V_R2 * V_R2):1, (((1 /
            sqrt(V_b)) - V_R2) * sqrt(V_b)) / (1
            - V_R2 * V_R2):2)
        if V_zona_C = 1 then
            begin
                set V_D1(1) to 1 + V_vano_R2 *
                    uniform 0.5,0.5
                set V_D1(2) to V_vano_R2 +
                    (sqrt(V_b) - V_vano_R2)
                    * uniform 0.5,0.5
            end
        else
            begin
                set V_D1(1) to V_vano_R2 + ((1
                    / sqrt(V_b)) -
                    V_vano_R2) * uniform
                    0.5,0.5
                set V_D1(2) to 1 + sqrt(V_b) *
                    uniform 0.5,0.5
            end
        end
    end
end

/* Scelta secondo punto di deposito D2 */
set V_zona_D2 to oneof(V_pa:1, V_pb:2, V_pc:3)
if V_zona_D2 = 1 then
    begin
        set V_D2(1) to 1 + V_vano_R1 * uniform
            0.5,0.5
        set V_D2(2) to 1 + V_vano_R1 * uniform
            0.5,0.5
    end
end
if V_zona_D2 = 2 then

```

```

begin
  set V_zona_B to oneof((V_R1 * (V_R2 -
    V_R1)) / (V_R2 * V_R2 - V_R1 *
    V_R1):1, ((V_R2 - V_R1) * V_R2) /
    (V_R2 * V_R2 - V_R1 * V_R1):2)
  if V_zona_B = 1 then
    begin
      set V_D2(1) to 1 + V_vano_R1 *
        uniform 0.5,0.5
      set V_D2(2) to V_vano_R1 +
        (V_vano_R2 - V_vano_R1)
        * uniform 0.5,0.5
    end
  else
    begin
      set V_D2(1) to V_vano_R1 +
        (V_vano_R2 - V_vano_R1)
        * uniform 0.5,0.5
      set V_D2(2) to 1 + V_vano_R2 *
        uniform 0.5,0.5
    end
  end
  if V_zona_D2 = 3 then
    begin
      set V_zona_C to oneof((V_R2 * (sqrt(V_b) -
        V_R2)) / (1 - V_R2 * V_R2):1, (((1 /
        sqrt(V_b)) - V_R2) * sqrt(V_b)) / (1
        - V_R2 * V_R2):2)
      if V_zona_C = 1 then
        begin
          set V_D2(1) to 1 + V_vano_R2 *
            uniform 0.5,0.5
          set V_D2(2) to V_vano_R2 +
            (sqrt(V_b) - V_vano_R2)
            * uniform 0.5,0.5
        end
      else
        begin
          set V_D2(1) to V_vano_R2 + ((1
            / sqrt(V_b)) -
            V_vano_R2) * uniform
            0.5,0.5
          set V_D2(2) to 1 + sqrt(V_b) *
            uniform 0.5,0.5
        end
      end
    end
  end

```

```

end
end

/* Scelta terzo punto di deposito D3 */
set V_zona_D3 to oneof(V_pa:1, V_pb:2, V_pc:3)
if V_zona_D3 = 1 then
begin
set V_D3(1) to 1 + V_vano_R1 * uniform
0.5,0.5
set V_D3(2) to 1 + V_vano_R1 * uniform
0.5,0.5
end
if V_zona_D3 = 2 then
begin
set V_zona_B to oneof((V_R1 * (V_R2 -
V_R1)) / (V_R2 * V_R2 - V_R1 *
V_R1):1, ((V_R2 - V_R1) * V_R2) /
(V_R2 * V_R2 - V_R1 * V_R1):2)
if V_zona_B = 1 then
begin
set V_D3(1) to 1 + V_vano_R1 *
uniform 0.5,0.5
set V_D3(2) to V_vano_R1 +
(V_vano_R2 - V_vano_R1)
* uniform 0.5,0.5
end
else
begin
set V_D3(1) to V_vano_R1 +
(V_vano_R2 - V_vano_R1)
* uniform 0.5,0.5
set V_D3(2) to 1 + V_vano_R2 *
uniform 0.5,0.5
end
end
if V_zona_D3 = 3 then
begin
set V_zona_C to oneof((V_R2 * (sqrt(V_b) -
V_R2)) / (1 - V_R2 * V_R2):1, (((1 /
sqrt(V_b)) - V_R2) * sqrt(V_b)) / (1
- V_R2 * V_R2):2)
if V_zona_C = 1 then
begin
set V_D3(1) to 1 + V_vano_R2 *

```

```

                                uniform 0.5,0.5
                                set V_D3(2) to V_vano_R2 +
                                    (sqrt(V_b) - V_vano_R2)
                                    * uniform 0.5,0.5
                                end
                                else
                                begin
                                set V_D3(1) to V_vano_R2 + ((1
                                    / sqrt(V_b)) -
                                    V_vano_R2) * uniform
                                    0.5,0.5
                                set V_D3(2) to 1 + sqrt(V_b) *
                                    uniform 0.5,0.5
                                end
                                end

                                /* Scelta primo punto di prelievo P1 */
                                set V_zona_P1 to oneof(V_pa:1, V_pb:2, V_pc:3)
                                if V_zona_P1 = 1 then
                                begin
                                set V_P1(1) to 1 + V_vano_R1 * uniform
                                    0.5,0.5
                                set V_P1(2) to 1 + V_vano_R1 * uniform
                                    0.5,0.5
                                end
                                if V_zona_P1 = 2 then
                                begin
                                set V_zona_B to oneof((V_R1 * (V_R2 -
                                    V_R1)) / (V_R2 * V_R2 - V_R1 *
                                    V_R1):1, ((V_R2 - V_R1) * V_R2) /
                                    (V_R2 * V_R2 - V_R1 * V_R1):2)
                                if V_zona_B = 1 then
                                begin
                                set V_P1(1) to 1 +
                                    V_vano_R1 * uniform
                                    0.5,0.5
                                set V_P1(2) to V_vano_R1 +
                                    (V_vano_R2 - V_vano_R1)
                                    * uniform 0.5,0.5
                                end
                                else
                                begin
                                set V_P1(1) to V_vano_R1 +
                                    (V_vano_R2 - V_vano_R1)

```

```

* uniform 0.5,0.5
set V_P1(2) to 1 + V_vano_R2 *
uniform 0.5,0.5
end
end
if V_zona_P1 = 3 then
begin
set V_zona_C to oneof((V_R2 * (sqrt(V_b) -
V_R2)) / (1 - V_R2 * V_R2):1, ((1 /
sqrt(V_b)) - V_R2) * sqrt(V_b)) / (1
- V_R2 * V_R2):2)
if V_zona_C = 1 then
begin
set V_P1(1) to 1 + V_vano_R2 *
uniform 0.5,0.5
set V_P1(2) to V_vano_R2 +
(sqrt(V_b) - V_vano_R2)
* uniform 0.5,0.5
end
else
begin
set V_P1(1) to V_vano_R2 + ((1
/ sqrt(V_b)) -
V_vano_R2) * uniform
0.5,0.5
set V_P1(2) to 1 + sqrt(V_b) *
uniform 0.5,0.5
end
end
end

/* Scelta secondo punto di prelievo P2 */
set V_zona_P2 to oneof(V_pa:1, V_pb:2, V_pc:3)
if V_zona_P1 = 1 then
begin
set V_P2(1) to 1 + V_vano_R1 * uniform
0.5,0.5
set V_P2(2) to 1 + V_vano_R1 * uniform
0.5,0.5
end
if V_zona_P2 = 2 then
begin
set V_zona_B to oneof((V_R1 * (V_R2 -
V_R1)) / (V_R2 * V_R2 - V_R1 *
V_R1):1, ((V_R2 - V_R1) * V_R2) /

```

```

(V_R2 * V_R2 - V_R1 * V_R1):2)
if V_zona_B = 1 then
begin
set V_P2(1) to 1 + V_vano_R1 *
uniform 0.5,0.5
set V_P2(2) to V_vano_R1 +
(V_vano_R2 - V_vano_R1)
* uniform 0.5,0.5
end
else
begin
set V_P2(1) to V_vano_R1 +
(V_vano_R2 - V_vano_R1)
* uniform 0.5,0.5
set V_P2(2) to 1 + V_vano_R2 *
uniform 0.5,0.5
end
end
if V_zona_P2 = 3 then
begin
set V_zona_C to oneof((V_R2 * (sqrt(V_b) -
V_R2)) / (1 - V_R2 * V_R2):1, (((1 /
sqrt(V_b)) - V_R2) * sqrt(V_b)) / (1
- V_R2 * V_R2):2)
if V_zona_C = 1 then
begin
set V_P2(1) to 1 + V_vano_R2 *
uniform 0.5,0.5
set V_P2(2) to V_vano_R2 +
(sqrt(V_b) - V_vano_R2)
* uniform 0.5,0.5
end
else
begin
set V_P2(1) to V_vano_R2 + ((1
/ sqrt(V_b)) -
V_vano_R2) * uniform
0.5,0.5
set V_P2(2) to 1 + sqrt(V_b) *
uniform 0.5,0.5
end
end
end

```

/* Scelta terzo punto di prelievo P3 */

```

set V_zona_P3 to oneof(V_pa:1, V_pb:2, V_pc:3)
if V_zona_P3 = 1 then
  begin
    set V_P3(1) to 1 + V_vano_R1 * uniform
      0.5,0.5
    set V_P3(2) to 1 + V_vano_R1 * uniform
      0.5,0.5
  end
if V_zona_P3 = 2 then
  begin
    set V_zona_B to oneof((V_R1 * (V_R2 -
      V_R1)) / (V_R2 * V_R2 - V_R1 *
      V_R1):1, ((V_R2 - V_R1) * V_R2) /
      (V_R2 * V_R2 - V_R1 * V_R1):2)
    if V_zona_B = 1 then
      begin
        set V_P3(1) to 1 + V_vano_R1 *
          uniform 0.5,0.5
        set V_P3(2) to V_vano_R1 +
          (V_vano_R2 - V_vano_R1)
          * uniform 0.5,0.5
      end
    else
      begin
        set V_P3(1) to V_vano_R1 +
          (V_vano_R2 - V_vano_R1)
          * uniform 0.5,0.5
        set V_P3(2) to 1 + V_vano_R2 *
          uniform 0.5,0.5
      end
    end
if V_zona_P3 = 3 then
  begin
    set V_zona_C to oneof((V_R2 * (sqrt(V_b) -
      V_R2)) / (1 - V_R2 * V_R2):1, (((1 /
      sqrt(V_b)) - V_R2) * sqrt(V_b)) / (1
      - V_R2 * V_R2):2)
    if V_zona_C = 1 then
      begin
        set V_P3(1) to 1 + V_vano_R2 *
          uniform 0.5,0.5
        set V_P3(2) to V_vano_R2 +
          (sqrt(V_b) - V_vano_R2)
          * uniform 0.5,0.5
      end

```

```

end
else
begin
set V_P3(1) to V_vano_R2 + ((1
/ sqrt(V_b)) -
V_vano_R2) * uniform
0.5,0.5
set V_P3(2) to 1 + sqrt(V_b) *
uniform 0.5,0.5
end
end

end

/* Esecuzione del ciclo STC, MSC', MSC'', MSC */
travel to magazzino.Zona(1,V_D1(1),V_D1(2))
if V_zona_D2 = V_zona_P1 then
begin
travel to magazzino.Zona(1,V_P1(1),V_P1(2))
if V_zona_D3 = V_zona_P2 then
begin
travel to
magazzino.Zona(1,V_P2(
),V_P2(2))
travel to
magazzino.Zona(1,V_P3(
),V_P3(2))
print "Ciclo MSC" to message
end
else
begin
travel to
magazzino.Zona(1,V_D3(1
),V_D3(2))
travel to
magazzino.Zona(1,V_P2(
),V_P2(2))
travel to
magazzino.Zona(1,V_P3(
),V_P3(2))
print "Ciclo MSC'" to message
end
end
else
begin

```

```

travel to magazzino.Zona(1,V_D2(1),V_D2(2))

if V_zona_D3 = V_zona_P1 then
    begin
        travel to
            magazzino.Zona(1,V_P1(
                ),V_P1(2))
        travel to
            magazzino.Zona(1,V_P2(
                ),V_P2(2))
        travel to
            magazzino.Zona(1,V_P3(
                ),V_P3(2))
        print "Ciclo MSC'" to message
    end
else
    begin
        travel to
            magazzino.Zona(1,V_D3(
                ),V_D3(2))
        travel to
            magazzino.Zona(1,V_P1(
                ),V_P1(2))
        travel to
            magazzino.Zona(1,V_P2(
                ),V_P2(2))
        travel to
            magazzino.Zona(1,V_P3(
                ),V_P3(2))
        print "Ciclo STC'" to message
    end
end

travel to magazzino.pd_IO(1)

set i to i + 1
end
/* Calcolo del tempo totale e stampa dati su file di output */
set V_tempo_totale to ac
print V_num_shuttle, ";", V_b, ";", V_R1, ";", V_R2, ";",
    V_pa, ";", V_pb, ";", V_pc, ";", V_num_cicli, ";",
    V_tempo_totale, ";", V_tempo_totale/V_num_cicli, ";",
    (V_tempo_totale/V_num_cicli)/6 to V_file_output
terminate
end

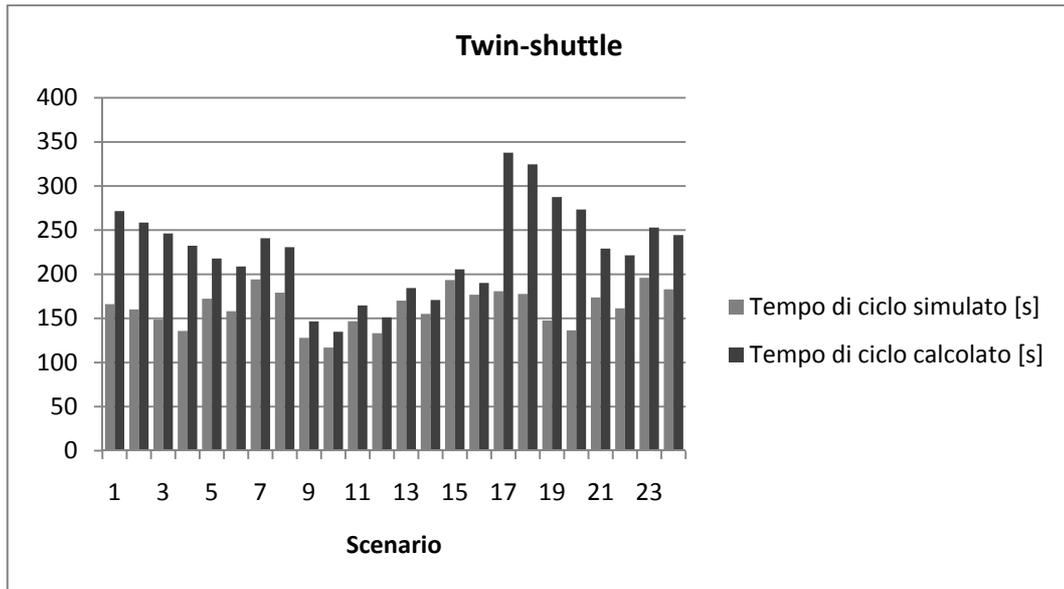
```

5.3 Risultati delle simulazioni

Allo scopo di verificare la capacità di previsione del modello, sono stati simulati 24 scenari ripetuti per il caso con trasloelevatori twin-shuttle e per quello con trasloelevatori triple-shuttle.

Si riportano nella seguente tabella i risultati delle simulazioni, i corrispondenti valori forniti dal modello analitico e gli scostamenti percentuali tra di essi per il caso con trasloelevatori twin-shuttle. I valori forniti dal modello analitico e da quello simulativo per ogni scenario sono inoltre riportati nel grafico che segue la tabella.

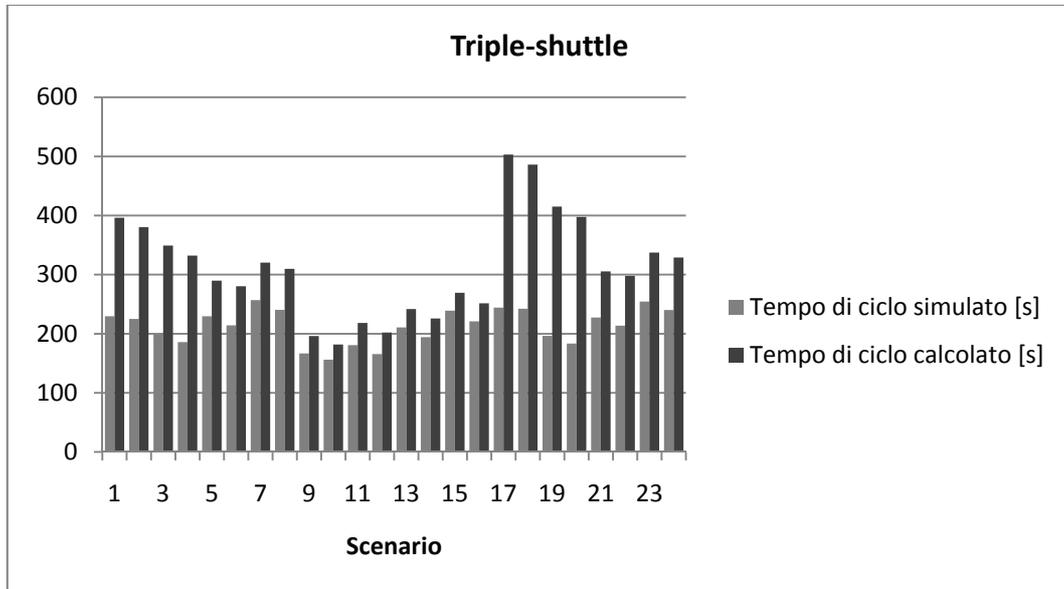
Scenario	N° shuttle	b	R ₁	R ₂	p _a	p _b	p _c	Tempo ciclo sim [s]	Tempo ciclo calc [s]	Δ%
1	2	0.4	0.55	0.95	0.5	0.3	0.2	166	272	63
2	2	0.4	0.45	0.95	0.5	0.3	0.2	160	259	61
3	2	0.6	0.55	0.77	0.5	0.3	0.2	149	246	66
4	2	0.6	0.45	0.77	0.5	0.3	0.2	136	232	71
5	2	0.8	0.55	0.77	0.5	0.3	0.2	172	218	26
6	2	0.8	0.45	0.77	0.5	0.3	0.2	158	209	32
7	2	1	0.55	0.77	0.5	0.3	0.2	194	241	24
8	2	1	0.45	0.77	0.5	0.3	0.2	179	231	29
9	2	0.4	0.55	0.95	0.6	0.35	0.05	128	147	15
10	2	0.4	0.45	0.95	0.6	0.35	0.05	117	135	15
11	2	0.6	0.55	0.77	0.6	0.35	0.05	147	165	12
12	2	0.6	0.45	0.77	0.6	0.35	0.05	133	151	13
13	2	0.8	0.55	0.77	0.6	0.35	0.05	170	184	8
14	2	0.8	0.45	0.77	0.6	0.35	0.05	155	171	10
15	2	1	0.55	0.77	0.6	0.35	0.05	193	205	6
16	2	1	0.45	0.77	0.6	0.35	0.05	177	190	8
17	2	0.4	0.55	0.95	0.45	0.3	0.25	181	338	87
18	2	0.4	0.45	0.95	0.45	0.3	0.25	178	325	83
19	2	0.6	0.55	0.77	0.45	0.3	0.25	148	287	95
20	2	0.6	0.45	0.77	0.45	0.3	0.25	136	273	100
21	2	0.8	0.55	0.77	0.45	0.3	0.25	174	229	32
22	2	0.8	0.45	0.77	0.45	0.3	0.25	161	221	37
23	2	1	0.55	0.77	0.45	0.3	0.25	196	253	29
24	2	1	0.45	0.77	0.45	0.3	0.25	183	245	34



Nella seguente tabella si riportano, invece, i risultati delle simulazioni, i corrispondenti valori forniti dal modello analitico e gli scostamenti percentuali tra di essi per il caso con trasloelevatori triple-shuttle. I valori forniti dal modello analitico e da quello simulativo per ogni scenario sono inoltre riportati nel grafico che segue la tabella.

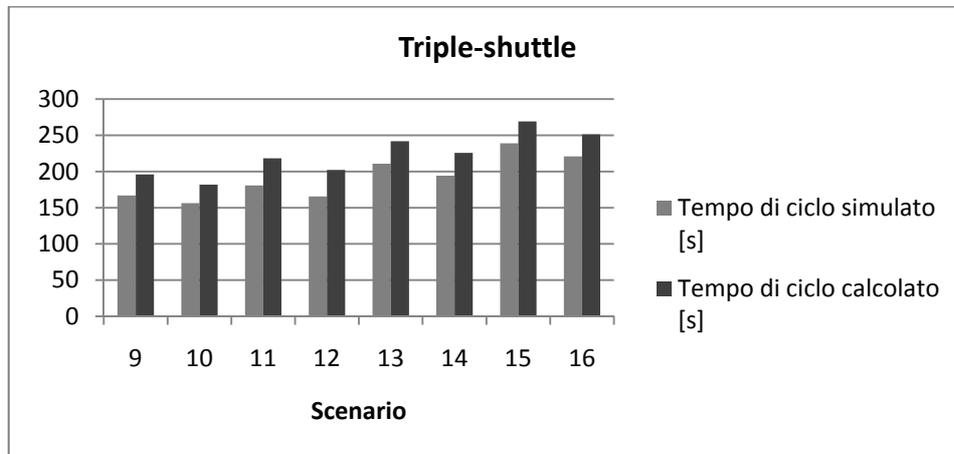
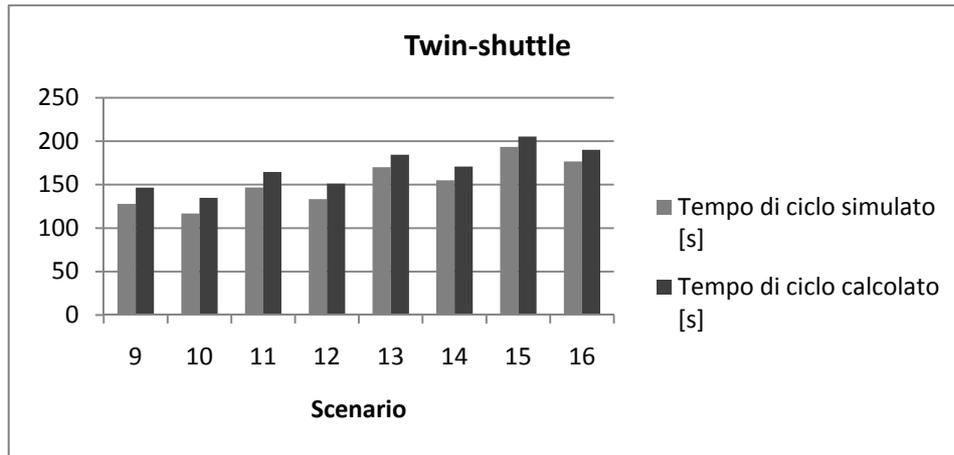
Scenario	N° shuttle	b	R ₁	R ₂	p _a	p _b	p _c	Tempo ciclo sim [s]	Tempo ciclo calc [s]	Δ%
1	3	0.4	0.55	0.95	0.5	0.3	0.2	230	396	73
2	3	0.4	0.45	0.95	0.5	0.3	0.2	225	380	69
3	3	0.6	0.55	0.77	0.5	0.3	0.2	200	349	74
4	3	0.6	0.45	0.77	0.5	0.3	0.2	186	332	79
5	3	0.8	0.55	0.77	0.5	0.3	0.2	230	290	26
6	3	0.8	0.45	0.77	0.5	0.3	0.2	214	280	31
7	3	1	0.55	0.77	0.5	0.3	0.2	257	320	25
8	3	1	0.45	0.77	0.5	0.3	0.2	240	310	29
9	3	0.4	0.55	0.95	0.6	0.35	0.05	167	196	18
10	3	0.4	0.45	0.95	0.6	0.35	0.05	156	182	16
11	3	0.6	0.55	0.77	0.6	0.35	0.05	181	218	21
12	3	0.6	0.45	0.77	0.6	0.35	0.05	166	202	22
13	3	0.8	0.55	0.77	0.6	0.35	0.05	211	242	15
14	3	0.8	0.45	0.77	0.6	0.35	0.05	194	226	16
15	3	1	0.55	0.77	0.6	0.35	0.05	239	269	13
16	3	1	0.45	0.77	0.6	0.35	0.05	221	251	14
17	3	0.4	0.55	0.95	0.45	0.3	0.25	244	503	106
18	3	0.4	0.45	0.95	0.45	0.3	0.25	242	486	101
19	3	0.6	0.55	0.77	0.45	0.3	0.25	196	415	112

20	3	0.6	0.45	0.77	0.45	0.3	0.25	183	398	117
21	3	0.8	0.55	0.77	0.45	0.3	0.25	227	305	34
22	3	0.8	0.45	0.77	0.45	0.3	0.25	214	298	39
23	3	1	0.55	0.77	0.45	0.3	0.25	254	337	33
24	3	1	0.45	0.77	0.45	0.3	0.25	240	329	37



Analizzando i dati riportati in tabella e osservando i grafici, si notano scostamenti significativi tra i valori del modello simulativo e quelli del modello analitico. Si può supporre che tali discrepanze siano in buona parte da ricondurre a due fattori: l'utilizzo delle distanze euclidee per il calcolo di t_{bb} , t_{cc} (nella configurazione II), t_{ab} , t_{ac} e t_{bc} e la presenza delle accelerazioni nel modello simulativo. Si noti infatti che il modello analitico sovrastima sistematicamente i tempi di ciclo medi delle simulazioni e che entrambi i fattori citati influiscono in questo senso sui risultati.

A una più approfondita analisi si nota che gli scostamenti assumono livelli molto più contenuti negli scenari in cui $p_a=0,6$, $p_b=0,35$ e $p_c=0,05$, come si può osservare dai seguenti grafici.



Questa osservazione porta a ipotizzare un problema legato alla valutazione dei tempi inerenti alla zona C che si minimizzano nel caso di $p_c=0,05$.

Si osservi infine che, all'interno di ogni configurazione di $p_a/p_b/p_c$ l'andamento dei dati del modello analitico corrisponde a quello del modello simulativo facendo supporre la presenza di un errore fisso collegato alle singole configurazioni.

Non si ritiene opportuno spingere oltre le considerazioni sulla validazione simulativa prima di aver rimosso dal modello analitico l'approssimazione legata alle distanze euclidee.

6 METODO ESATTO PER IL CALCOLO DI t_{bb} , t_{cc} (NELLA CONFIGURAZIONE II), t_{ab} , t_{ac} E t_{bc}

Come accennato al paragrafo 4.3, è stato sviluppato un metodo per il calcolo dei valori di t_{bb} , t_{cc} (nella configurazione II), t_{ab} , t_{ac} e t_{bc} oneroso in termini di complessità e di tempo. Questo capitolo ha lo scopo di illustrare tale metodo tramite la sua applicazione al calcolo di t_{bc} nella configurazione I.

Il metodo si basa sul valore atteso condizionato e sulla seguente proprietà:

$$E[E[Y|X]] = E[Y]$$

dove X e Y sono due variabili aleatorie.

Si consideri di voler calcolare il valore atteso della distanza tra i punti $(x_1, y_1) \in Z_1$ e $(x_2, y_2) \in Z_2$ definita come $d = \max\{|x_1 - x_2|, |y_1 - y_2|\}$. Si consideri fissato il punto (x_1, y_1) e si calcoli $E[d|X_1 = x_1 \wedge Y_1 = y_1]$; si applichi la proprietà precedentemente enunciata e si calcoli $E[d] = E[E[d|X_1 = x_1 \wedge Y_1 = y_1]]$.

6.1 Calcolo di t_{bc} nella configurazione I

Si chiamino:

$(x_B, y_B) \rightarrow$ punto della zona B;

$X_B, Y_B \rightarrow$ variabili aleatorie associate a x_B e y_B ;

$(x_C, y_C) \rightarrow$ punto della zona C;

$X_C, Y_C \rightarrow$ variabili aleatorie associate a x_C e y_C ;

$$d = \max\{|x_B - x_C|, |y_B - y_C|\}$$

e si consideri di voler calcolare $t_{bc} = E[d]$.

Si scelga di considerare fisso il punto (x_C, y_C) ; allo scopo calcolare $E[d|X_C = x_C \wedge Y_C = y_C]$, è necessario suddividere la zona B rispetto alle coordinate del punto (x_C, y_C) e verticalmente in R_1 e in $R_2 - \sqrt{b}$, avendo ipotizzato che $R_2 - \sqrt{b} > R_1$ (Figura 6.1).

Si calcolino $E[E[d|X_C = x_C \wedge Y_C = y_C \wedge (x_B, y_B) \in B_i]], i = 1, \dots, 5$.

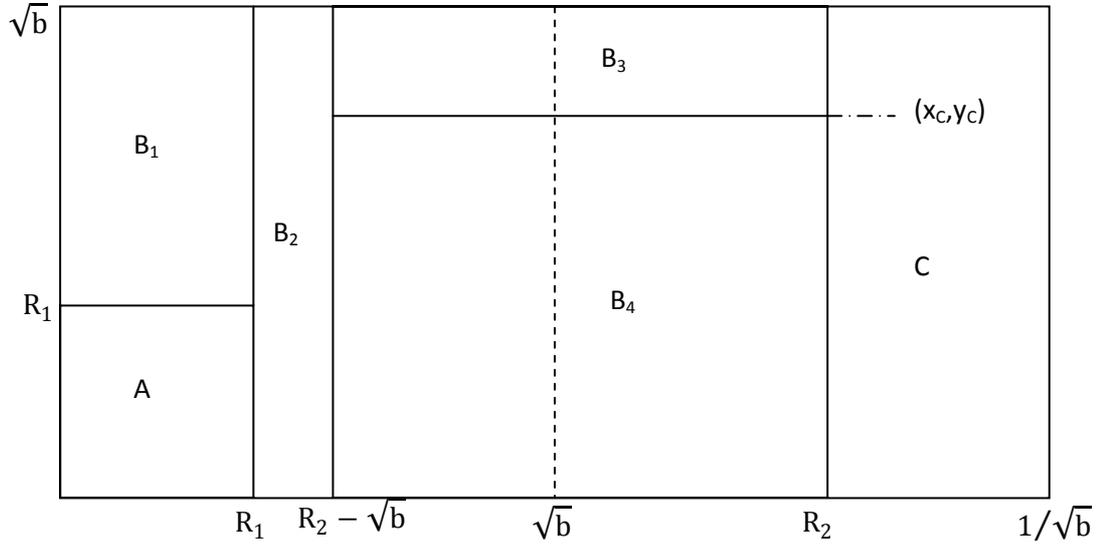


Figura 6.1

$$B_1 \rightarrow x_B \in (0, R_1) \wedge y_B \in (R_1, \sqrt{b})$$

$$\begin{aligned} E[d|X_C = x_C \wedge Y_C = y_C \wedge (x_B, y_B) \in B_1] &= \\ &= \frac{1}{R_1(\sqrt{b}-R_1)} \int_{R_1}^{\sqrt{b}} \int_0^{R_1} (x_C - x_B) dx_B dy_B = \\ &= x_C - \frac{R_1}{2} \end{aligned}$$

$$B_2 \rightarrow x_B \in (R_1, R_2 - \sqrt{b}) \wedge y_B \in (0, \sqrt{b})$$

$$\begin{aligned} E[d|X_C = x_C \wedge Y_C = y_C \wedge (x_B, y_B) \in B_2] &= \\ &= \frac{1}{\sqrt{b}(R_2-\sqrt{b}-R_1)} \int_0^{\sqrt{b}} \int_{R_1}^{R_2-\sqrt{b}} (x_C - x_B) dx_B dy_B = \\ &= x_C - \frac{R_2-\sqrt{b}+R_1}{2} \end{aligned}$$

$$B_3 \rightarrow x_B \in (R_2 - \sqrt{b}, R_2) \wedge y_B \in (y_C, \sqrt{b})$$

$$F_x(z) = \begin{cases} 0 & z < x_C - R_2 \\ \frac{z-(x_C-R_2)}{\sqrt{b}} & x_C - R_2 \leq z < x_C - (R_2 - \sqrt{b}) \\ 1 & z \geq x_C - (R_2 - \sqrt{b}) \end{cases}$$

$$F_y(z) = \begin{cases} 0 & z < 0 \\ \frac{z}{\sqrt{b}-y_C} & 0 \leq z < \sqrt{b}-y_C \\ 1 & z \geq \sqrt{b}-y_C \end{cases}$$

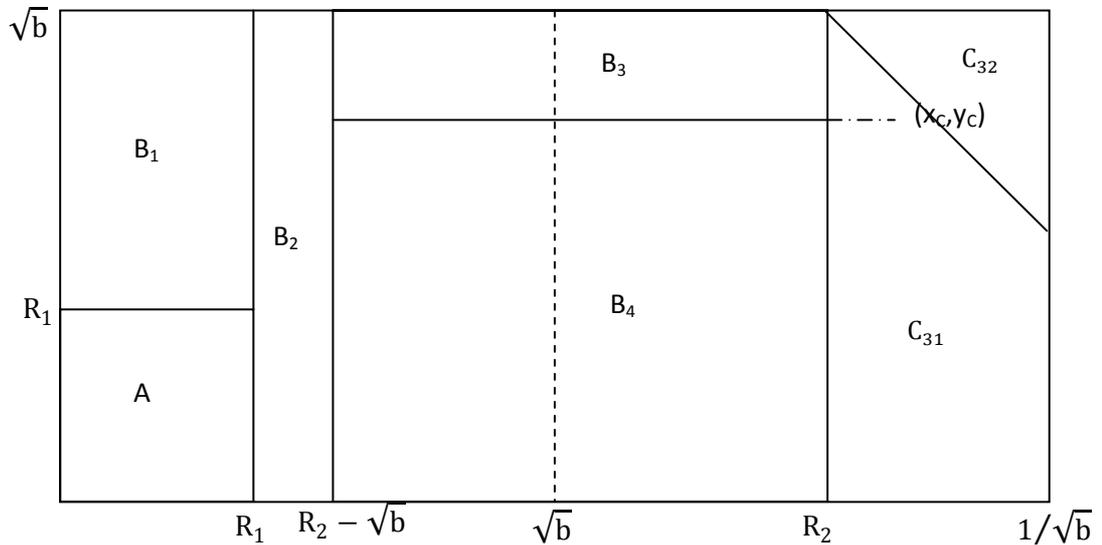


Figura 6.2

Caso 1 $\rightarrow x_C - R_2 \leq \sqrt{b} - y_C$

$$F_{xy}(z) = \begin{cases} 0 & z < x_C - R_2 \\ \frac{z^2 - (x_C - R_2)z}{\sqrt{b}(\sqrt{b} - y_C)} & x_C - R_2 \leq z < \sqrt{b} - y_C \\ \frac{z - (x_C - R_2)}{\sqrt{b}} & \sqrt{b} - y_C \leq z < x_C - (R_2 - \sqrt{b}) \\ 1 & z \geq x_C - (R_2 - \sqrt{b}) \end{cases}$$

$$f_{xy}(z) = \begin{cases} \frac{2z - (x_C - R_2)}{\sqrt{b}(\sqrt{b} - y_C)} & x_C - R_2 \leq z < \sqrt{b} - y_C \\ \frac{1}{\sqrt{b}} & \sqrt{b} - y_C \leq z < x_C - (R_2 - \sqrt{b}) \\ 0 & \text{altrove} \end{cases}$$

$E[d|X_C = x_C \wedge Y_C = y_C \wedge (x_C, y_C) \in C_{31} \wedge (x_B, y_B) \in B_3] =$

$$= \int_{x_C - R_2}^{\sqrt{b} - y_C} z \frac{2z - (x_C - R_2)}{\sqrt{b}(\sqrt{b} - y_C)} dz + \int_{\sqrt{b} - y_C}^{x_C - (R_2 - \sqrt{b})} z \frac{1}{\sqrt{b}} dz$$

Caso 2 $\rightarrow x_C - R_2 > \sqrt{b} - y_C$

$$F_{xy}(z) = \begin{cases} 0 & z < x_C - R_2 \\ \frac{z - (x_C - R_2)}{\sqrt{b}} & x_C - R_2 \leq z < x_C - (R_2 - \sqrt{b}) \\ 1 & z \geq x_C - (R_2 - \sqrt{b}) \end{cases}$$

$$f_{xy}(z) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{b}} & x_C - R_2 \leq z < x_C - (R_2 - \sqrt{b}) \\ 0 & \text{altrove} \end{cases}$$

$$\begin{aligned} E[d|X_C = x_C \wedge Y_C = y_C \wedge (x_C, y_C) \in C_{32} \wedge (x_B, y_B) \in B_3] &= \\ &= \int_{x_C - R_2}^{x_C - (R_2 - \sqrt{b})} z \frac{1}{\sqrt{b}} dz \end{aligned}$$

Per procedere è necessario ipotizzare che $R_2 + \sqrt{b} > \frac{1}{\sqrt{b}}$.

$$\begin{aligned} E[d|X_C = x_C \wedge Y_C = y_C \wedge (x_B, y_B) \in B_3] &= \\ &= \frac{\left(\frac{1}{\sqrt{b}} - R_2\right)\sqrt{b} - \frac{1}{2}\left(\frac{1}{\sqrt{b}} - R_2\right)^2}{\left(\frac{1}{\sqrt{b}} - R_2\right)\sqrt{b}} \cdot \\ &\cdot E[d|X_C = x_C \wedge Y_C = y_C \wedge (x_C, y_C) \in C_{31} \wedge (x_B, y_B) \in B_3] + \\ &+ \frac{\frac{1}{2}\left(\frac{1}{\sqrt{b}} - R_2\right)^2}{\left(\frac{1}{\sqrt{b}} - R_2\right)\sqrt{b}} \cdot E[d|X_C = x_C \wedge Y_C = y_C \wedge (x_C, y_C) \in C_{32} \wedge (x_B, y_B) \in B_3] \end{aligned}$$

$$B_4 \rightarrow x_B \in (R_2 - \sqrt{b}, R_2) \wedge y_B \in (0, y_C)$$

$$F_x(z) = \begin{cases} 0 & z < x_C - R_2 \\ \frac{z - (x_C - R_2)}{\sqrt{b}} & x_C - R_2 \leq z < x_C - (R_2 - \sqrt{b}) \\ 1 & z \geq x_C - (R_2 - \sqrt{b}) \end{cases}$$

$$F_y(z) = \begin{cases} 0 & z < 0 \\ \frac{z}{y_C} & 0 \leq z < y_C \\ 1 & z \geq y_C \end{cases}$$

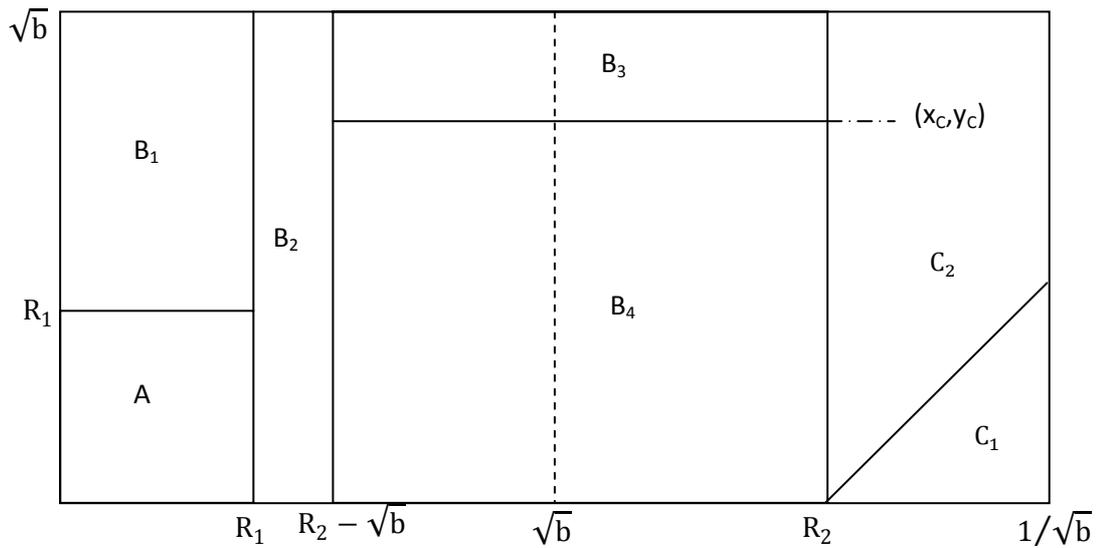


Figura 6.3

Caso 1 $\rightarrow y_C \leq x_C - R_2$

$$F_{xy}(z) = \begin{cases} 0 & z < x_C - R_2 \\ \frac{z - (x_C - R_2)}{\sqrt{b}} & x_C - R_2 \leq z < x_C - (R_2 - \sqrt{b}) \\ 1 & z \geq x_C - (R_2 - \sqrt{b}) \end{cases}$$

$$f_{xy}(z) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{b}} & x_C - R_2 \leq z < x_C - (R_2 - \sqrt{b}) \\ 0 & \text{altrove} \end{cases}$$

$$E[d|X_C = x_C \wedge Y_C = y_C \wedge (x_C, y_C) \in C_{41} \wedge (x_B, y_B) \in B_4] =$$

$$= \int_{x_C - R_2}^{x_C - (R_2 - \sqrt{b})} z \frac{1}{\sqrt{b}} dz$$

Caso 2 $\rightarrow y_C > x_C - R_2$

$$F_{xy}(z) = \begin{cases} 0 & z < x_C - R_2 \\ \frac{z^2 - (x_C - R_2)z}{\sqrt{b}y_C} & x_C - R_2 \leq z < y_C \\ \frac{z - (x_C - R_2)}{\sqrt{b}} & y_C \leq z < x_C - (R_2 - \sqrt{b}) \\ 1 & z \geq x_C - (R_2 - \sqrt{b}) \end{cases}$$

$$f_{xy}(z) = \begin{cases} \frac{2z - (x_C - R_2)}{\sqrt{b}y_C} & x_C - R_2 \leq z < y_C \\ \frac{1}{\sqrt{b}} & y_C \leq z < x_C - (R_2 - \sqrt{b}) \\ 0 & \text{altrove} \end{cases}$$

$$E[E[d|X_C = x_C \wedge Y_C = y_C \wedge (x_C, y_C) \in C_{42} \wedge (x_B, y_B) \in B_4]] =$$

$$\begin{aligned}
&= \int_{x_C - R_2}^{y_C} z \frac{2z - (x_C - R_2)}{\sqrt{b}y_C} dz + \int_{y_C}^{x_C - (R_2 - \sqrt{b})} z \frac{1}{\sqrt{b}} dz \\
E[d|X_C = x_C \wedge Y_C = y_C \wedge (x_B, y_B) \in B_4] &= \\
&= \frac{\frac{1}{2}(\frac{1}{\sqrt{b}} - R_2)^2}{(\frac{1}{\sqrt{b}} - R_2)\sqrt{b}} \cdot \\
&\cdot E[d|X_C = x_C \wedge Y_C = y_C \wedge (x_C, y_C) \in C_{41} \wedge (x_B, y_B) \in B_4] + \\
&+ \frac{(\frac{1}{\sqrt{b}} - R_2)\sqrt{b} - \frac{1}{2}(\frac{1}{\sqrt{b}} - R_2)^2}{(\frac{1}{\sqrt{b}} - R_2)\sqrt{b}} \cdot \\
&\cdot E[d|X_C = x_C \wedge Y_C = y_C \wedge (x_C, y_C) \in C_{42} \wedge (x_B, y_B) \in B_4]
\end{aligned}$$

È ora possibile calcolare $E[d|X_C = x_C \wedge Y_C = y_C]$ come

$$\begin{aligned}
E[d|X_C = x_C \wedge Y_C = y_C] &= \\
&= \frac{R_1(\sqrt{b} - R_1)}{R_2\sqrt{b} - R_1^2} \cdot E[d|X_C = x_C \wedge Y_C = y_C \wedge (x_B, y_B) \in B_1] + \\
&+ \frac{(R_2 - \sqrt{b} - R_1)\sqrt{b}}{R_2\sqrt{b} - R_1^2} \cdot E[d|X_C = x_C \wedge Y_C = y_C \wedge (x_B, y_B) \in B_2] + \\
&+ \frac{\sqrt{b}(\sqrt{b} - y_C)}{R_2\sqrt{b} - R_1^2} \cdot E[d|X_C = x_C \wedge Y_C = y_C \wedge (x_B, y_B) \in B_3] + \\
&+ \frac{\sqrt{b} - y_C}{R_2\sqrt{b} - R_1^2} \cdot E[d|X_C = x_C \wedge Y_C = y_C \wedge (x_B, y_B) \in B_4]
\end{aligned}$$

Applicando la precedentemente enunciata proprietà del valore atteso condizionato, si può rimuovere l'ipotesi di aver fissato il punto (x_C, y_C) .

$$\begin{aligned}
t_{bc} &= E[E[d|X_C = x_C \wedge Y_C = y_C]] = \\
&= \frac{1}{(\frac{1}{\sqrt{b}} - R_2)\sqrt{b}} \int_{R_2}^{\frac{1}{\sqrt{b}}} \int_0^{\sqrt{b}} E[d|X_C = x_C \wedge Y_C = y_C] dy_C dx_C = \\
&= \frac{1 - 5\sqrt{b}R_2 - 4b + 12b^3R_1^2R_2^2 - 12b^3R_1^3R_2 + 16b^2\sqrt{b}R_2 + 5b^2R_2^4 - 4b^3R_2^4 - b^2\sqrt{b}R_2^5}{24b^2\sqrt{b}(\sqrt{b}R_2 - 1)(R_1^2 - \sqrt{b}R_2)} + \\
&+ \frac{16b^2\sqrt{b}R_2^3 - 6b^3\sqrt{b}R_2^3 + 10bR_2^2 - 5b^4R_2^2 - 12b^2R_1^2 + 6b^3R_2^2 - 24b^2R_2^2 - 2b^4\sqrt{b}R_2}{24b^4(\sqrt{b}R_2 - 1)(R_1^2 - \sqrt{b}R_2)} + \\
&+ \frac{10b^3\sqrt{b}R_2 + 12b^2\sqrt{b}R_1^3 - 6b^2\sqrt{b}R_2 - 10b\sqrt{b}R_2^3 - 5b^3 + 6b^2 + 2b^4}{24b^4(\sqrt{b}R_2 - 1)(R_1^2 - \sqrt{b}R_2)}
\end{aligned}$$

CONCLUSIONI

Al termine di questa trattazione si ritiene opportuno fare alcune considerazioni sul processo che ha portato alla realizzazione del modello descritto, sulle sue possibilità di miglioramento e sulle applicazioni alle quali si può prestare.

Il percorso che ha portato alla formulazione del modello è stato tutt'altro che lineare: ci si è spesso trovati in vicoli ciechi, costretti ad abbandonare idee che parevano promettenti o stupiti nell'ottenere risultati da intuizioni che non sembravano aver futuro. Esemplare in questo senso è stata la soluzione al problema del calcolo dei tempi medi di trasferimento intra-zona e inter-zona; essa infatti è stata messa a punto quando, dopo mesi di idee scartate, sembrava che non restasse più nulla di intentato.

Per quanto risulti evidente la notevole approssimazione dei risultati attualmente forniti dal modello, si ritiene che esso possa essere notevolmente migliorato dalla sostituzione dei calcoli effettuati considerando le distanze euclidee con la sistematica applicazione del metodo illustrato nel capitolo 6. La presenza di un modello simulativo per il confronto dei risultati consentirà inoltre di monitorare in ogni momento i miglioramenti ottenuti e l'analisi di diversi scenari permetterà di comprendere in quale direzione operare per avere un modello sempre più aderente alla realtà.

Infine, si ritiene interessante la possibilità di affinare questo modello perché può risultare di utile applicazione a supporto della progettazione preliminare di magazzini automatizzati e perciò la sua rilevanza non si esaurisce in ambito accademico. Purtroppo la sua fruibilità risulta intrinsecamente limitata dalla complessità delle formule risultanti che non possono convergere in un modello compatto e di immediato utilizzo. Si considera tuttavia che un'interessante soluzione a tale problema potrebbe risiedere nella creazione di un applicativo che fornisca la valutazione del tempo di ciclo in base al modello descritto e che rappresenti perciò un'interfaccia semplice per l'utente interessato all'utilizzo pratico del modello.

BIBLIOGRAFIA

A. Pareschi, E. Ferrari, A. Persona, A. Regattieri (2002), *Logistica integrata e flessibile*, Bologna, Esculapio

A.Y. Bozer, J.A. White (1984), “Travel-time models for automated storage/retrieval systems”, *IIE Transactions*, vol. 16, n° 4, 1984, pp. 329–338

R.D. Meller, A. Mungwattana (1995), “Multi-shuttle automated storage/retrieval systems”, *Technical Report 95-06*, Department of Industrial Engineering, Auburn University

R.D. Meller, A. Mungwattana (1997), “Multi-shuttle automated storage/retrieval systems”, *IIE Transactions*, vol. 29, 1997, pp. 925–938

A. Eynan, M. J. Rosenblatt (1994), “Establishing zones in single-command class-based rectangular AS/RS”, *IIE Transactions*, vol. 26, 1994, pp. 38–46

M. J. Rosenblatt, A. Eynan (1989), “Deriving the optimal boundaries for class-based automatic Storage/Retrieval system”, *Management Science*, vol.35, n° 12, 1989, pp. 1519–1524

RINGRAZIAMENTI

Al termine di questa tesi desidero innanzitutto ringraziare il Professor Gamberi per la disponibilità con la quale ha ricoperto l'incarico di relatore, per avermi proposto un argomento di lavoro stimolante e per avermi costantemente guidata nel suo svolgimento.

Inoltre vorrei esprimere la mia sincera gratitudine al Professor Bosello per le numerose ore dedicate alla soluzione del problema matematico che ha rappresentato il maggiore ostacolo alla realizzazione della mia tesi; un ringraziamento particolarmente sentito per aver saputo coniugare la professionalità dell'esperto con una grande attenzione per le mie esigenze.

È d'obbligo esprimere riconoscenza verso i miei genitori per il sostegno economico ma desidero soprattutto ringraziarli per avermi sempre spronata a dare il massimo nello studio e per aver saputo accettare anche i miei compromessi. Un altro grosso grazie ai miei genitori, a mia sorella e ai miei nonni che mi hanno sopportata nei periodi di stress e che mi hanno reso semplice la vita a casa.

Non basterebbe una pagina per ringraziare Samuele che mi ha sempre sostenuta, aiutata, consolata, sgridata, ascoltata, sopportata, incoraggiata,... anche se intanto aveva la sua tesi da preparare!

Un ringraziamento speciale va a Stefano e Donatella per aver fornito, loro malgrado, il posto dove ho lavorato alla tesi e anche alla preparazione di quasi tutti gli esami e per essermi stati vicini come una seconda famiglia. Grazie anche a Sandra per i caffè che mi ha offerto e che ho rifiutato ma che mi hanno concesso delle piacevolissime pause dallo studio.

Infine ringrazio i miei amici e in modo particolare i compagni di corso per aver condiviso con me gioie e dolori di questi anni di università ma soprattutto appunti, libri, conoscenze da "giorno prima dell'esame", pizze al Pirata del Porto e aperitivi al Bar Margherita!