

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

Analisi di impianti per la logistica industriale dotati di sistemi
di ricarica dinamici e senza contatto per veicoli elettrici



Relatori:

Prof. Franco Lombardi

Prof. Paolo Guglielmi

Dott.ssa Giulia Bruno

Ing. Emiliano Traini

Ing. Alberto Faveto

Candidato:

Gianmarco Santoro

Anno Accademico 2020-2021

SOMMARIO

ACRONIMI, SIMBOLI & ABBREVIAZIONI	VII
Variabili	IX
ABSTRACT	- 1 -
1. INTRODUZIONE E OBIETTIVO	- 2 -
1.1 Introduzione	- 2 -
1.2 Obiettivo	- 5 -
2. STATO DELL'ARTE	- 8 -
2.1 Wireless Power Transmission	- 8 -
2.1.1 WPT: la tecnologia e le applicazioni	- 8 -
2.1.2 WPT: il know-how di <i>Enermove</i>	- 11 -
2.1.3 WPT: ottimizzazione	- 14 -
2.2 Ottimizzazione: gli algoritmi genetici	- 17 -
2.2.1 Ottimizzazione	- 17 -
2.2.2 Algoritmi Genetici	- 20 -
3. METODO, MODELLO E OTTIMIZZAZIONE. CASO DI STUDIO <i>ENERMOVE</i>	- 23 -
3.1 Metodo	- 23 -
3.1.1 Discretizzazione	- 25 -
3.1.2 Parametri	- 32 -
3.2 Modello	- 46 -
3.2.1 Analisi tempistiche	- 46 -

3.2.2	Analisi energetica	- 49 -
3.2.3	Analisi economica	- 54 -
3.2.4	Modello matematico	- 56 -
3.3	Ottimizzazione	- 59 -
3.3.1	Algoritmo genetico (Matlab)	- 59 -
3.3.2	Risultati	- 65 -
3.3.3	Verifica del modello	- 69 -
4.	MANUALE D'USO DELLO STRUMENTO	- 74 -
5.	CONCLUSIONI	- 77 -
6.	SVILUPPI FUTURI	- 81 -
7.	BIBLIOGRAFIA	- 83 -
8.	APPENDICE	- 88 -
8.1	Flow Chart di calcolo	- 88 -
8.2	Listati Matlab	- 94 -
8.2.1	Algoritmo genetico: MainWPT.m	- 95 -
8.2.2	Funzione di ottimizzazione: CostFun.m	- 99 -
8.2.3	Funzione di vincolo: MyConstr.m	- 101 -

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 – Esempio di area dedicata alla sostituzione e ricarica batterie [16]	- 5 -
Figura 2 – Illustrazione a solo scopo esemplificativo di applicazione WPT [17]	- 7 -
Figura 3 – Schema elettrico equivalente generale di un sistema WPT [24]	- 9 -
Figura 4 – Schema componenti del sistema WPT in un'applicazione automotive [28]	- 10 -
Figura 5 – Schema d'impianto WPT per carrelli elevatori [24]	- 11 -
Figura 6 – Schema dei moduli trasmittenti al di sotto della pavimentazione [11]	- 11 -
Figura 7 – Rappresentazione CAD di bobine trasmittenti con Overlap [11]	- 12 -
Figura 8 – Disposizione bobine con (b) e senza (a) Overlap, in rosso la ricevente [24]	- 12 -
Figura 9 – Modellazione a variabili continue (a) o discrete (b) [27]	- 15 -
Figura 10 – Processo iterativo di modellazione [37]	- 18 -
Figura 11 – Esempio di Single-point Crossover [42]	- 21 -
Figura 12 – Esempio di Two-points Crossover [42]	- 21 -
Figura 13 – Esempio di mutazione [43]	- 22 -
Figura 14 – Esempi di layout per scaffali nei magazzini [48]	- 26 -
Figura 15 – Esempio di pianta di un magazzino con indicazione grandezze	- 27 -
Figura 16 – Applicazione degli indici delle celle di discretizzazione in pianta	- 28 -
Figura 17 – Dimensioni scaffalatura [49]	- 36 -
Figura 18 – Pianta di magazzino con impianto WPT esteso per il 50% dell'area scaffali	- 39 -
Figura 19 – Metodi per la scelta dei percorsi per i veicoli logistici nei magazzini [48]	- 41 -
Figura 20 – Criteri di uscita dall'algoritmo	- 60 -
Figura 21 – Grafico: Numero di WPT – Costo Totale d'impianto	- 61 -
Figura 22 – Grafico: Numero di WPT – Variazione SoC	- 62 -
Figura 23 – Heatmap, rappresentazione matrice-pianta delle posizioni dei WPT	- 62 -
Figura 24 – Intervalli di Δ SoC realizzabili in un turno	- 73 -

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 – Compendio parametri e risultati ottimizzazione	- 67 -
Tabella 2 – Analisi scenari	- 71 -
Tabella 3 – Analisi statistica scenari	- 72 -

INDICE DELLE EQUAZIONI

Equazione (1) – Quantificazione celle	- 28 -
Equazione (2) – Matrice indici	- 28 -
Equazione (3) – Matrici delle dimensioni	- 29 -
Equazione (4) – Probabilità costante	- 32 -
Equazione (5) – Matrice delle probabilità	- 32 -
Equazione (6) – Tempi di attraversamento medi	- 33 -
Equazione (7) – Tempo di percorrenza cella	- 33 -
Equazione (8) – Dimensione di attraversamento cella	- 34 -
Equazione (9) – Traiettoria ad arco di circonferenza	- 34 -
Equazione (10) – Probabilità di operazione in una corsia	- 34 -
Equazione (11) – Tempo di attraversamento medio pesato	- 35 -
Equazione (12) – Tempo medio di operazione	- 36 -
Equazione (13) – Matrice delle altezze	- 36 -
Equazione (14) – Matrice dei tempi medi di operazione	- 37 -
Equazione (15) – Ubiche con/senza WPT	- 38 -
Equazione (16) – Matrice posizioni WPT	- 38 -
Equazione (17) – Totale WPT installate	- 38 -
Equazione (18) – Percentuale di area con WPT sul totale	- 38 -
Equazione (19) – Tempi totali di operazione e percorrenza	- 42 -
Equazione (20) – Matrice dei tempi totali di operazione e percorrenza	- 42 -
Equazione (21) – Tempi totali di operazione collegati al WPT	- 43 -

Equazione (22) – Matrice dei tempi totali di operazione con collegamento al WPT	- 43 -
Equazione (23) – Tempo totale di operazione pesato sulle probabilità	- 44 -
Equazione (24) – Matrice dei tempi totali di operazione pesati sulle probabilità	- 44 -
Equazione (25) – Tempi totali di operazione collegati al WPT pesati sulle probabilità	- 45 -
Equazione (26) – Matrice dei tempi totali di operazione con WPT pesati sulle probabilità	- 45 -
Equazione (27) – Tempo medio pesato per operazione	- 46 -
Equazione (28) – Tempo medio pesato di operazione con collegamento al WPT	- 47 -
Equazione (29) – Quota di tempo medio pesato di operazione con ricarica	- 47 -
Equazione (30) – Tempo medio di ricarica durante operazione in banchina	- 48 -
Equazione (31) – Tempo complessivo medio ponderato di operazione	- 48 -
Equazione (32) – Tempo complessivo medio ponderato di ricarica in operazione media	- 48 -
Equazione (33) – Consumo istantaneo medio ponderato del veicolo	- 49 -
Equazione (34) – Numero di pause in un turno	- 50 -
Equazione (35) – Tempo totale di pausa in un turno	- 50 -
Equazione (36) – Energia totale immagazzinabile in batteria	- 51 -
Equazione (37) – Numero di operazione in un turno di lavoro	- 51 -
Equazione (38) – Energia accumulata in un'operazione	- 52 -
Equazione (39) – Energia consumata in un'operazione	- 52 -
Equazione (40) – Variazione energia in batteria in un'operazione	- 52 -
Equazione (41) – Variazione SoC in un turno, solo contributo ricarica dinamica	- 52 -
Equazione (42) – Energia accumulata dal sistema statico nel turno	- 53 -
Equazione (43) – Variazione energia in batteria nel turno	- 53 -
Equazione (44) – Variazione SoC nel turno	- 53 -
Equazione (45) – SoC batteria a fine turno	- 53 -
Equazione (46) – Costo totale d'impianto	- 54 -
Equazione (47) – Numero totale di bobine installate	- 55 -
Equazione (48) – Discontinuità dell'impianto	- 57 -

Equazione (49) – Discontinuità dell’impianto	- 58 -
Equazione (50) – Probabilità costante	- 78 -
Equazione (51) – Probabilità cumulata di stoccaggio	- 79 -

INDICE DELLE MATRICI

Matrice 1 – Pianta-matrice indicativa della proprietà di visualizzazione data dalle matrici	- 30 -
Matrice 2 – Lunghezze delle celle [m]	- 30 -
Matrice 3 – Larghezza delle ubiche [m]	- 31 -
Matrice 4 – Probabilità di stoccaggio [-]	- 33 -
Matrice 5 – Tempi di percorrenza [s]	- 35 -
Matrice 6 – Altezze scaffali adiacenti all’ubica [-]	- 37 -
Matrice 7 – Tempi di permanenza su ubica per operazione agli scaffali [s]	- 37 -
Matrice 8 – Posizioni delle coppie di bobine WPT [valori binari]	- 38 -
Matrice 9 – Tempi totali di operazione agli scaffali e percorrenza [s]	- 43 -
Matrice 10 – Tempi totali di operazione con collegamento al WPT [s]	- 44 -
Matrice 11 – Tempi totali di operazione pesati sulle probabilità [s]	- 45 -
Matrice 12 – Tempi totali di operazione collegati al WPT pesati sulle probabilità [s]	- 45 -
Matrice 13 – Posizioni ottimizzate delle coppie di bobine WPT nel caso di studio	- 65 -
Matrice 14 – Probabilità di stoccaggio [-]	- 77 -
Matrice 15 – Probabilità di stoccaggio in forma planimetrica [-]	- 78 -
Matrice 16 – Probabilità di stoccaggio cumulata [-]	- 79 -

Acronimi, simboli & abbreviazioni

- **WPT:** “Wireless Power Transmission”, indica un sistema di trasmissione di energia elettrica tramite circuito magnetico, senza contatto, tra trasmittente (alimentazione) e ricevente (carico). Nel testo è utilizzato il termine WPT anche per indicare l’elemento infrastrutturale trasmittente progettato da Enermove, formato da una coppia di bobine.
- **WCU:** “Wireless Charging Units”, designa un componente modulare che forma la bobina trasmittente dell’impianto.
- **IPT:** “Inductive Power Transfer”, in analogia al WPT, indica un sistema di trasferimento di potenza elettrica tramite induzione elettromagnetica.
- **CPT:** “Capacitive Power Transfer”, designa un sistema di trasferimento dell’energia elettrica principalmente tramite effetti capacitivi del sistema.
- **DWC:** “Dynamic Wireless Charging”, designa il sistema di ricarica WPT con utilizzo dinamico, cioè mentre il veicolo da ricaricare è in movimento.
- **CWD:** “Charge While Driving”, analogo al DWC, indica l’utilizzo della ricarica dinamica con il veicolo in moto.
- **SoC:** “State of Charge”, indica il livello di carica della batteria percentuale, relativamente alla capacità massima della stessa.
- **LOS:** “Level of Service”, qualifica rispetto a diversi fattori, la qualità del traffico nel tratto selezionato.
- **DC/AC:** sistema di elettronica di potenza detto “inverter” in grado di convertire una corrente continua in ingresso in una corrente alternata in uscita, variandone i parametri di ampiezza e frequenza.
- **A.G.:** acronimo di Algoritmo Genetico.
- **EVs:** “Electric Vehicles”, cioè veicoli elettrici o al singolare EV.
- **AGV:** “Automated/Automatic Guided Vehicle”, designa i veicoli a guida autonoma.
- Se non diversamente specificato: $\Sigma = \sum_{i=0}^l, \sum_{j=1}^m \dots$
- **Automotive:** settore industriale degli autotrasporti.
- **Software:** programma.
- **Cella** o **Ubica:** in analogia alla “*mesh*” (maglia) del dominio in un metodo agli elementi finiti, denota una porzione discreta dell’area utile considerata. Per cella o ubica (termine gergale) si intende quindi una porzione discreta (area rettangolare) nel magazzino. È utile per individuare le differenti porzioni della pianta in valutazione e descriverne le differenti caratteristiche.
- **Gap:** dall’inglese, significa “apertura, vuoto, intervallo”, nel contesto di questo lavoro è la distanza tra il piano della bobina trasmittente e quello di giacitura della bobina ricevente.

- **In-door o out-door**: traducibili rispettivamente in “al chiuso” e “all’aperto”.
- **Overlap**: dall’inglese “sovraposizione”.
- **CAD**: “Computer-Aided Design/Drafting”, sigla che comprende tutti i software per il disegno e la progettazione tecnica.
- **PM**: programmazione matematica.
- **RO**: ricerca operativa.
- **PO**: problema di ottimizzazione.
- **PL**: modelli di programmazione lineare.
- **PNL**: modelli di programmazione non lineare.
- **PLI**: modelli di programmazione lineare intera.
- **POD**: modelli di ottimizzazione discreta.
- **PB**: modelli di programmazione booleana, con variabili binarie.
- **PLIM**: modelli di programmazione lineare intera mista.
- **Bit**: variabile binaria [1, 0].
- **Heatmap**: “mappa di calore” rappresentazione grafica tramite colori dei valori di una matrice, usualmente la tonalità del colore varia proporzionalmente al valore in quel punto.
- **Rng**: “random number generator”, algoritmo di generazione di una sequenza di numeri casuali.
- **Seed**: “seme”, segna il punto di partenza nell’algoritmo di generazione di numeri random per ottenere la stessa sequenza ad ogni avvio.
- **UDM**: Unità di misura.

Variabili

Legenda pedici:

- t – totale
- b – operazione in banchina
- c – complessivo = totale (t) + operazione in banchina (b)
- n – non in ricarica (senza WPT)
- w – in collegamento di ricarica (con WPT)
- $\%$ – espresso in percentuale
- h – espresso in ore, diversamente, se non indicato, è espresso in secondi

Nomenclatura variabili:

- *minuscola*: variabile riferita ad una singola cella
- *medio*: valor medio, con una sopralineatura
- *pesato*: valor medio pesato, con doppia sopralineatura
- *MAIUSCOLA*: variabile riferita all'intero sistema magazzino
- *MAIUSCOLA-GRASSETTO*: variabile matriciale

Variabili delle caratteristiche d'impianto:

- x, y : ipotesi iniziale dimensioni celle discretizzazione (lunghezza, larghezza). [m]
- l, m : numero di celle di discretizzazione sul piano (righe, colonne matrici). [-]
- i, j : indici di identificazione delle celle nelle matrici. [-]
- $l_{u_{ij}}, l_{a_{ij}}$: lunghezza, larghezza cella di discretizzazione. [m]
- \bar{v} : velocità veicolo. [m/s]
- p_{ij} : probabilità di operazione in una cella. [-]
- $t_{r_{ij}}$: traiettorie percorribili in una cella. [m]
- $\bar{t}_{a_{ij}}, \bar{\bar{t}}_{a_{ij}}$: tempo di attraversamento cella. [s]
- \bar{T}_{hp} : tempo ipotizzato operazione agli scaffali. [s]
- h_{ij} : coefficiente di altezza scaffali adiacenti alla cella. [-]
- $\bar{t}_{o_{ij}}$: tempo operazione agli scaffali. [s]
- w_{ij} : presenza o assenza modulo WPT, termine binario. [bit]
- $\bar{t}_{t_{ij}}, \bar{\bar{t}}_{t_{ij}}$: tempo totale: andata banchina-cellula, operazione scaffali e ritorno. [s]
- $\bar{t}_{tw_{ij}}, \bar{\bar{t}}_{tw_{ij}}$: quota di tempo totale di operazione collegato al WPT. [s]

- \bar{T}_t : tempo totale: andata, operazione scaffali e ritorno, rispetto al magazzino. [s]
- $\bar{T}_{tw}, \bar{T}_{tw\%}$: quota di tempo totale collegato al WPT, rispetto al magazzino. [s, %]
- \bar{T}_b : ipotesi tempo di operazione in banchina. [s]
- $\bar{T}_{bw}, \bar{T}_{bw\%}$: tempo in ricarica statica durante un'operazione in banchina. [s, %]
- \bar{T}_c : tempo complessivo di operazione. Corrisponde alla somma dei tempi di andata da banchina a cella, operazione scaffali, ritorno, operazione in banchina:

$$\bar{T}_c = \bar{T}_b + \bar{T}_t. \text{ [s]}$$
- \bar{T}_{cw} : tempo complessivo di ricarica in un'operazione completa. [s]

Variabili energetico-economiche:

- P_{max} : potenza di picco dichiarata del veicolo in analisi. [W]
- \bar{P}_{traz} : potenza di consumo veicolo in condizione di sola trazione. [%]
- \bar{P}_{mista} : consumo veicolo condizione mista, trazione e sollevamento carichi. [%]
- \bar{P} : potenza di consumo veicolo. [W]
- T_{hturno} : tempo di un turno. [h]
- \bar{T}_{hinter} : intervallo tra due pause. [h]
- \bar{T}_{hpausa} : tempo di una pausa. [h]
- \bar{n}_{pause} : numero di pause in un turno. [-]
- \bar{T}_{hpause} : tempo totale di pausa in un turno. [h]
- n_{disc} : numero di discontinuità presenti nell'impianto. [-]
- l_{modWPT} : lunghezza di un modulo WPT (2,5 m circa). [m]
- n_{modWPT} : numero di moduli WPT installati. [-]
- $n_{celleWPT}$: numero di celle dotate di impianto WPT. [-]
- $n_{modWPT_{stat}}$: numero di stazioni di ricarica statica. [-]
- E : energia complessiva accumulabile in batteria. [J]
- V : tensione di alimentazione batteria. [V]
- Ah : capacità batteria. [Ah]
- \bar{n}_{op} : numero di operazioni effettuate in un turno. [-]
- $\bar{E}_{opaccdin}, \bar{E}_{turnoaccdin}$: energia accumulata durante un'operazione (turno). [J]
- $\bar{E}_{opcons}, \bar{E}_{turnocons}$: energia consumata durante un'operazione (turno). [J]
- $\Delta\bar{E}_{op}, \Delta\bar{E}_{turno}$: variazione del livello di energia in batteria. [J]
- $\bar{E}_{turnoaccstat}$: energia accumulata con ricarica statica durante le pause turno. [J]
- P_{nom} : potenza nominale impianto WPT. [W]

- η_{stat} : rendimento di ricarica in condizioni statiche. [-]
- η_{din} : rendimento di ricarica in condizioni dinamiche. [-]
- $\Delta\overline{SoC}_{turno_{din}}$: variazione SoC in un turno per ricarica dinamica e la quota di ricarica statica sfruttata durante le operazioni in banchina. [%]
- $\Delta\overline{SoC}_{turno}$: variazione SoC totale in un turno. [%]
- $SoC_{iniz}, \overline{SoC}_{finale}$: stato batteria ad inizio (fine) turno. [%]
- c_{WPT} : costo unitario coppia bobine statiche o dinamiche (transmetter). [€/pz]
- c_{rec} : costo unitario receiver (elettronica di potenza a bordo macchina). [€/pz]
- n_{veic} : numero di veicoli equipaggiati con il sistema di ricarica dinamica. [-]
- C_{fix} : costi fissi di impianto. [€]
- C_{tot} : costo totale dell'impianto. [€]

Abstract

L'obiettivo di questo lavoro di tesi consiste nello sviluppare una metodologia per la progettazione ottimizzata dell'infrastruttura dei sistemi di ricarica batterie per veicoli elettrici, progettati ed installati dall'azienda Enermove.

Tali sistemi consentono la ricarica, sia dinamica che statica, senza contatto (WPT).

Attualmente, il focus aziendale è rivolto verso le applicazioni per carrelli elevatori di servizio logistico: frontali, trilaterali, commissionatori, eventuali AGV ed altri veicoli.

A tale scopo è stato realizzato un metodo di analisi dei casi progettuali per la migliore installazione del sistema considerando sia termini energetici, secondo le necessità del cliente, che la minimizzazione del costo d'impianto.

Nello studio sono considerati aspetti di tipo logistico, costruttivo, gestionale ed energetico dello stabilimento in esame.

Il risultato dell'analisi è un insieme di parametri che descrivono il sistema nel suo complesso. I parametri sono collegati a formare un modello matematico utile al fine di ottimizzare la quantità e la posizione di installazione dell'elemento modulare del sistema: la coppia di bobine trasmettitrici.

1. Introduzione e obiettivo

1.1 Introduzione

Negli ultimi anni, grazie anche alla sensibilizzazione dell'opinione pubblica da parte della comunità scientifica, i temi di salvaguardia ambientale e climatica, oltre a molti aspetti di sostenibilità energetica, sono crescentemente entrati nella considerazione ed interesse generale degli organi normatori ed anche nelle politiche aziendali di tante aziende operanti nei settori tecnologici [1].

L'interesse verso queste tematiche nasce dalla coscienza degli effetti che l'utilizzo di fonti non rinnovabili ha sull'ambiente e sulla salute dell'uomo, rispettivamente legati a [2]:

- Gas climalteranti, liberati durante i processi di combustione, principalmente CO_2 (anidride carbonica), che incidono sull'aumento globale della temperatura media sulla superficie del pianeta su quale viviamo.
- Polveri sottili, principalmente $PM_{2,5}$, PM_{10} , NO_x , responsabili dell'aumento di alcune patologie legate soprattutto agli apparati respiratorio e cardiovascolare [3].

Permane inoltre, il fatto che le fonti energetiche non rinnovabili, in quanto tali, sono esauribili, limite secondo il quale è temporalmente inevitabile una transizione totale verso fonti rinnovabili.

Un concetto tra i più esaminati della questione climatica è sicuramente l'elettrificazione del consumo finale dell'energia, metodo per accelerare la de-carbonizzazione e la transizione energetica attuale verso forme sostenibili. Questo processo è in linea con gli obiettivi dell'accordo di Parigi e dell'Agenda 2030 delle Nazioni Unite per lo sviluppo sostenibile [4], nei quali è previsto, con un'intensità sempre maggiore, la conversione dalla dipendenza energetica delle attività antropiche da fonti non rinnovabili, verso quelle rinnovabili.

Fin dalla prima rivoluzione industriale, infatti, la crescente domanda energetica mondiale è stata sopportata principalmente con l'utilizzo di combustibili fossili, quali: idrocarburi, tra cui si annoverano i derivati del petrolio, il carbone o ancora il gas naturale.

Ad oggi i combustibili fossili sono ancora la prima risorsa energetica. In Unione Europea al 2017 si conta, come fonti di energia primaria:

- 31,6% petrolio.
- 24,4% gas naturale.
- 14,8% fonti rinnovabili.
- 14,4% legnami e carbone.

- 13,4% nucleare.

In particolare, nel periodo tra il 2005 e il 2017 si è visto un calo del consumo generale d'energia primaria consumata pari al 9%, contestualmente ad un sostanziale raddoppio della produzione da energie rinnovabili, passando da 7,2% a 14,8% nello stesso periodo e mantenendo un tendenza in aumento [5].

Tale transizione energetica, come detto in precedenza, non riguarda solo la fonte primaria di approvvigionamento dell'energia, ma anche l'aumento dell'efficienza nel consumo della stessa, tema per il quale è in atto l'elettrificazione dei veicoli. Il settore dei trasporti ha sicuramente un ruolo chiave in questa fase, tant'è vero che, nel 2019 negli USA, ha contribuito per una quota di circa 28% [6] del consumo energetico globale.

Contemporaneamente, sono in sviluppo tecnologie per migliorare gli aspetti limitanti della transizione energetica, che per quanto riguarda il settore dei trasporti a trazione elettrica, è determinante, prima su tutte, la questione ricarica.

Le batterie dei veicoli elettrici, ad oggi, permettono in genere autonomie inferiori rispetto ai veicoli a motore endotermico. Il fattore batterie-autonomia ha un duplice aspetto, dato che per aumentare l'autonomia, oltre a migliorarne l'efficienza, si può aumentare la quantità in volume del pacco batteria, assistendo però ad un proporzionale e consistente aumento di peso del veicolo con conseguente incremento del consumo per unità di distanza percorsa [7] e necessità di ulteriori accorgimenti tecnici che ne conseguono.

Un successivo limite riguarda i tempi di ricarica dei EVs, con valori anche di diverse ore per raggiungere la carica completa ($SoC = 100\%$), in dipendenza del tipologia di veicolo, della batteria, e del sistema di ricarica.

Un ultimo aspetto comprende le infrastrutture, tra cui le stazioni per la ricarica, che al momento non sono adeguate al soddisfacimento di una domanda sempre più crescente, sebbene anche in questa direzioni vi siano provvedimenti di adeguamento in atto sia da parte di aziende interessate che dagli enti preposti [8].

In questo frangente, una soluzione che riscontra sempre più interesse [9], [10] è la tecnologia di ricarica detta *Wireless Power Transmission* (WPT).

Il WPT¹, sviluppato anche da *Enermove*, consiste in un sistema di trasferimento dell'energia elettrica senza contatto che, molto sinteticamente, è composto da due bobine, la

¹ Si rimanda al capitolo “WPT: la tecnologia e le applicazioni” per ulteriori dettagli rispetto alla tecnologia.

trasmettente a terra, alimentata da corrente alternata, che si accoppia magneticamente alla *ricevente*, a bordo veicolo, nella quale si forma una corrente, gestita dall'elettronica di potenza per ricaricare la batteria [11].

1.2 Obiettivo

Come descritto nel capitolo “WPT: la tecnologia e le applicazioni”, la tecnologia WPT si sta sviluppando in diverse campi. Tra questi trova applicazione nei veicoli della logistica industriale, tema su cui attualmente l’azienda *Enermove* sta investendo e sul quale si concentra questo lavoro.

Enermove propone un innovativo sistema di ricarica WPT, per carrelli elevatori di servizio logistico², che consenta la ricarica dei veicoli elettrici a batteria andando a sopperire e migliorando tanti aspetti negativi presenti nei sistemi di ricarica standard attuali.

Attualmente le tecnologie di alimentazione dei carrelli elevatori sono principalmente tre, che in ordine di costo risultano [11], [12], [13], [14], [15]:

- Al piombo acido: necessitano di zone appositamente dedicate alla ricarica, in quanto generano gas nocivi. Questo implica un costo per la gestione delle batterie, considerando il tempo dedicato, il personale specializzato, l’area di magazzino occupata e gli impianti necessari.
- Al piombo ermetiche: non presentano il problema di gestione delle batterie al piombo acido, ma necessitano comunque di fermi macchina per ricaricare il veicolo.
- Agli ioni di litio: presentano ulteriori vantaggi in termini di peso, ma hanno un costo molto più elevato.

Usualmente la ricarica delle batterie avviene in aree apposite, dove, al veicolo, è sostituito il pacco di batterie scarico con uno carico.



Figura 1 – Esempio di area dedicata alla sostituzione e ricarica batterie [16]

² I carrelli elevatori sono l’attuale focus aziendale di *Enermove*, in futuro non è escluso l’aumento dei campi di applicazione, oltre a quello indoor attuale.

Il sistema *Enermove* elimina la necessità di sostituzione delle batterie o di fermare la macchina per eventuali ricariche, anche rapide. Di conseguenza, l'impianto progettato dall'azienda, trova i suoi punti di forza nel risparmio diretto e indiretto dovuto ai costi dati da:

- Fermo macchina e personale dedicato per procedere alla ricarica.
- Aree di magazzino occupate.
- Impianti di ricarica dedicati.

Inoltre:

- È utilizzabile da più carrelli contemporaneamente.
- È facilmente integrabile con sistemi di autoproduzione dell'energia, ad esempio da sistemi fotovoltaici, consentendo un utilizzo diretto della stessa, senza la necessità di accumularla.
- Il sistema è facilmente integrabile con gli impianti esistenti nei contesti della logistica industriale, senza il bisogno di onerose modifiche invasive. Infatti, l'impianto è installato al di sotto della pavimentazione senza alterazione della struttura del magazzino.
- Per i livelli di potenza tipici non è richiesto il rifacimento degli impianti elettrici a monte del sistema.

Questi punti sono giustificati in quanto, questo tipo di impianto, permette:

- La ricarica statica: attiva già quando il veicolo vi è parcheggiato sopra. Non necessita di azioni di collegamento/scollegamento di connettori per la ricarica.
- La ricarica dinamica³: consente l'alimentazione continua del veicolo fintantoché rimane posizionato in aree dotate di bobine trasmissenti.

A solo titolo illustrativo, è mostrata in seguito un'immagine indicativa delle posizioni in cui potrebbe essere installato l'impianto in questione. Si nota che combacia con le aree di passaggio dei carrelli a lavoro.

³ DWC: "Dynamic Wireless Charging", indica l'utilizzo dei sistemi di ricarica WPT mentre il veicolo è in movimento, altrimenti detto "Charge While Driving" (CWD).

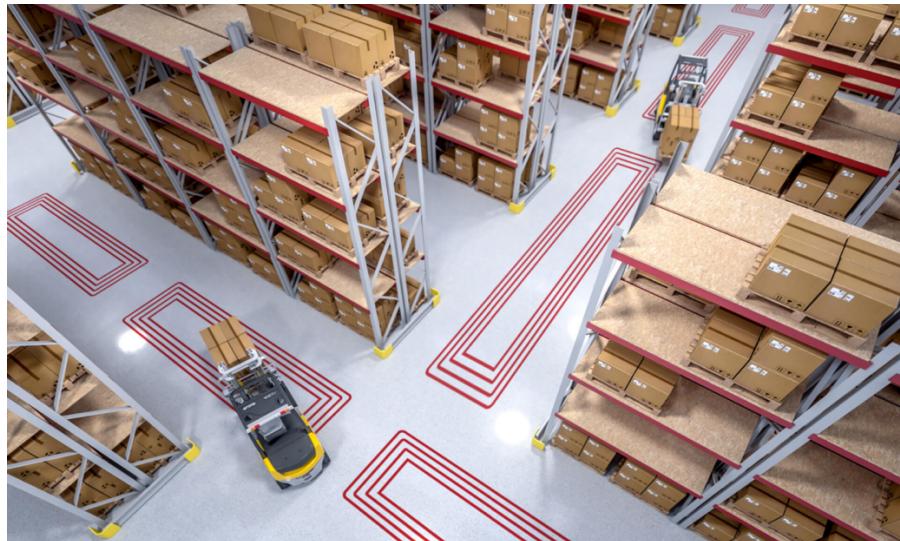


Figura 2 – Illustrazione a solo scopo esemplificativo di applicazione WPT [17]

Una delle caratteristiche fondamentali di questo tipo di impianto è la modularità dei componenti che costituiscono le bobine trasmettenti. Questo permette di adattare il sistema secondo le esigenze applicative del cliente, considerando:

- Le caratteristiche fisiche del magazzino in studio:
 - Layout.
 - Logica gestionale.
- Necessità del cliente:
 - Prestazioni energetiche richieste.
 - Costo complessivo ammissibile.

L'esigenza della realizzazione del presente lavoro di tesi si inserisce proprio in questo contesto e nasce dalla necessità di possedere uno strumento per poter analizzare criticamente tutti gli aspetti dei vari casi progettuali che si presentano.

L'obiettivo della tesi sta quindi nello sviluppare un metodo che consideri tutti gli parametri influenti nella progettazione ottimale dell'impianto, al fine di ottenere un livello di carica nei veicoli tale da soddisfare le esigenze gestionali che il mandante richiede. Pertanto, questa analisi è finalizzata nell'individuare le posizioni ed il numero ottimale di moduli di ricarica tali da minimizzare il costo totale dell'impianto finale.

2. Stato dell'arte

2.1 Wireless Power Transmission

2.1.1 WPT: la tecnologia e le applicazioni

Come mostrato in precedenza, la tecnologia WPT⁴ sta trovando un crescente interesse industriale nelle sue realizzazioni grazie anche allo sviluppo dell'elettronica e dei dispositivi a batteria. Questo sistema consente il trasferimento di energia elettrica senza contatto [18].

La tecnologia si sviluppa con due principali approcci nelle applicazioni industriali [19]:

- IPT: “Inductive Power Transfer”.
- CPT: “Capacitive Power Transfer”.
- Ed un terzo: ibrido IPT-CPT.

Lo studio di questa tecnologia si è sviluppato con crescente interesse dalla seconda metà del '900, migliorando sostanziali aspetti progettuali e di efficienza.

Le possibili applicazioni, future o attuali, spaziano in molti settori [20], [21], [22]:

- Veicoli, dove troviamo sia le applicazioni ai veicoli industriali come già discusso, che quelle ai veicoli privati o pubblici per il trasporto di merci o persone, tra cui anche treni.
- Robotica, droni e UAVs, con una tecnologia differente, adatta a coprire grandi distanze, detta *Microwave Power Transfer* (MPT).
- Sensori e domotica (MPT).
- Computer, smartphones e dispositivi indossabili.
- Dispositivi per la cura della persona, ad esempio spazzolini e rasoi elettrici.
- Elettrodomestici, ad esempio i mixer da cucina.
- Applicazioni mediche, ad esempio in dispositivi elettronici per impianti cardiaci, quali pacemaker che necessitano di ricariche periodiche.
- In generale sui sistemi elettrici ed elettronici dotati, o meno, di batteria.

⁴ La prima dimostrazione di WPT è stata realizzata da Nikola Tesla nel 1898, mentre la prima applicazione commerciale è stata introdotta nel 1994.

Gli impianti WPT sono generalmente composti da due bobine, la *trasmettente* a terra⁵, e la *ricevente*, a bordo veicolo, oltre ai componenti capacitivi⁶ di compensazione che lavorano in condizioni di risonanza⁷.

La bobina trasmittente è alimentata, tramite un convertitore DC/AC⁸, con corrente alternata ad alta frequenza così da generare un campo magnetico, il quale a sua volta si concatena con la bobina ricevente, ai capi della quale si registra una corrente indotta alterna [23]. Questa corrente è gestita a bordo veicolo dall'elettronica di potenza che, nel caso *Enermove*, partiziona l'elettricità verso il motore e le batteria in base all'esigenza [11].

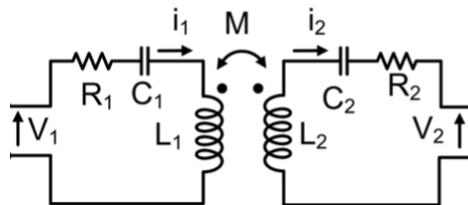


Figura 3 – Schema elettrico equivalente generale di un sistema WPT [24]

Moderna sistemi WPT raggiungono anche efficienze del 94% [25], laddove l'accoppiamento magnetico è stabile, cioè con un buon posizionamento reciproco bobina trasmittente–ricevente ed alla distanza giusta. Infatti, uno degli elementi determinanti nel mantenere efficiente la trasmissione energetica è sicuramente il *gap*⁹ [26] e l'allineamento tra impianto trasmittente e ricevente, come anche la regolazione della frequenza della tensione di alimentazione.

Nelle applicazioni WPT per veicoli è possibile trasferire energia in condizioni statiche, quando il mezzo è fermo sopra alla bobina trasmittente, indicata appunto come condizione di ricarica statica.

⁵ Nel caso si tratti di un'applicazione del WPT ai veicoli, diversamente, la bobina trasmittente può avere altri alloggi, come nel caso degli smartphones dove le bobine sono inserite in dei cosiddetti "tappetini di ricarica" da tavolo.

⁶ Componenti capacitivi: due condensatori.

⁷ Si lavora in condizioni di risonanza per massimizzare l'efficienza, il trasferimento di potenza e ridurre le dimensioni dell'elettronica di potenza.

⁸ DC/AC: sistema di elettronica di potenza detto "inverter" in grado di convertire una corrente continua in ingresso in una corrente alternata in uscita, variandone i parametri di ampiezza e frequenza.

⁹ Gap: dall'inglese, significa "apertura, vuoto, intervallo" distanza tra il piano della bobina trasmittente e quello di giacitura della bobina ricevente.

O ancora, mentre il veicolo è in movimento, detta ricarica dinamica, spesso indicata come “Charge While Driving” (CWD) [27].

È mostrato in seguito un diagramma schematico dei componenti del sistema nel caso di applicazione automotive.

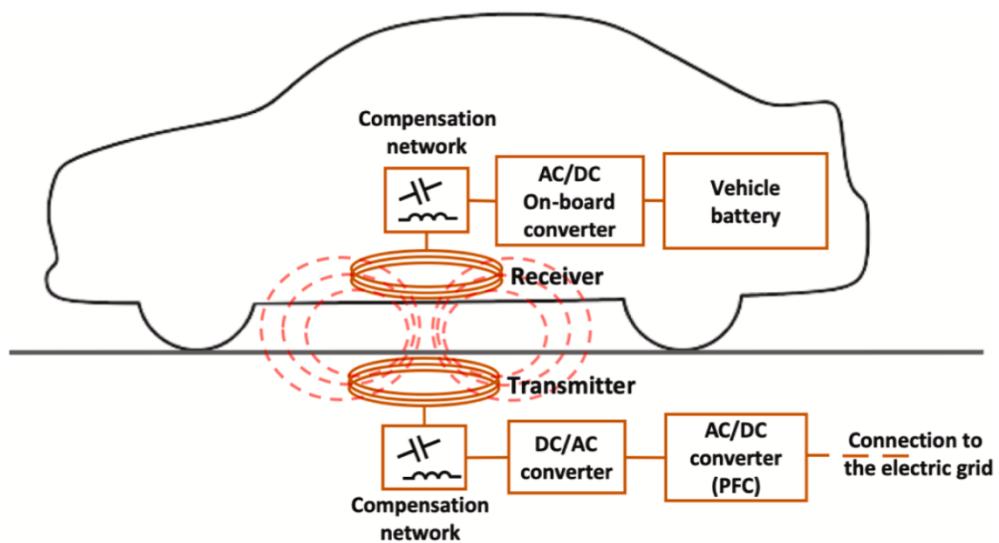


Figura 4 – Schema componenti del sistema WPT in un'applicazione automotive [28]

2.1.2 WPT: il know-how di *Enermove*

Il Professor *Paolo Guglielmi* e il ricercatore *Vincenzo Cirimele*, co-fondatori dell'azienda *Enermove*, durante la loro attività accademica hanno sviluppato la tecnologia WPT che oggi è alla base della proposta innovativa dalla compagnia [29], [26], [30].

Attualmente *Enermove* si sta occupando di sistemi di ricarica WPT, con particolare interesse riguardo la ricarica in-door e dinamica (DWC) nella logistica industriale.

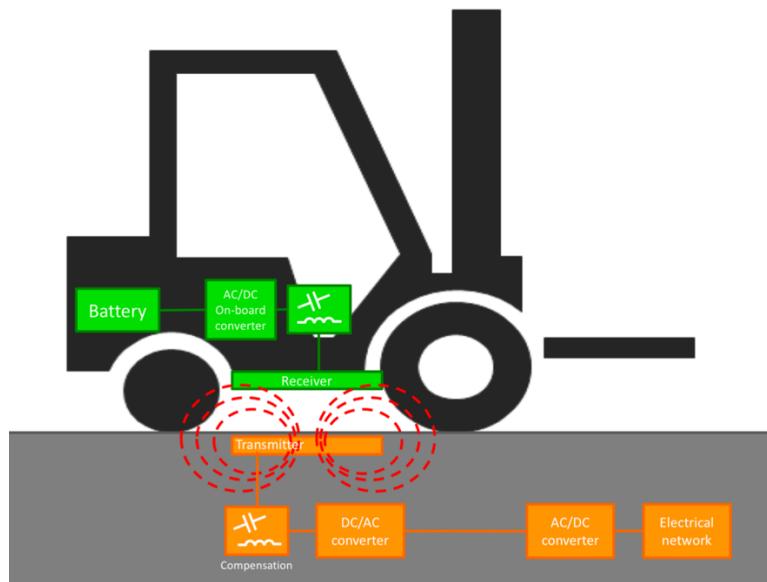


Figura 5 – Schema d'impianto WPT per carrelli elevatori [24]

Enermove ha sviluppato una tecnologia WPT con bobine trasmissori modulari e integrabili al di sotto della pavimentazione dello stabilimento. Questo processo permette la realizzazione di corsie dotate di un numero di moduli proporzionale alle necessità del cliente, che consentono la continua alimentazione del veicolo anche in movimento.

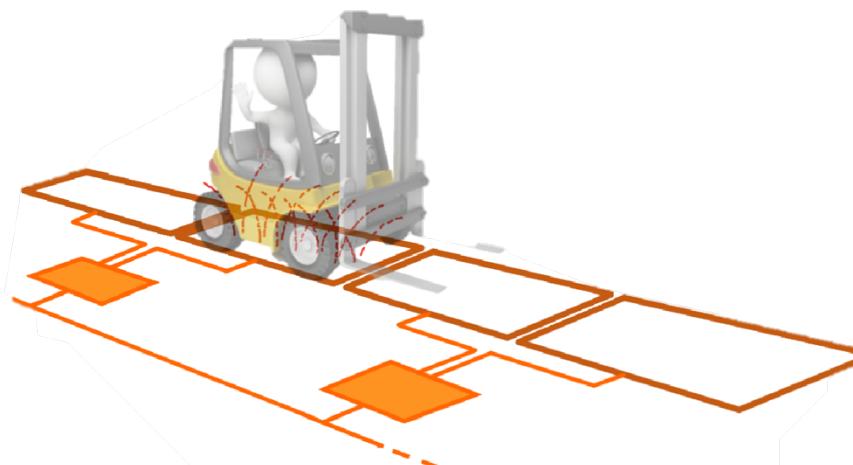


Figura 6 – Schema dei moduli trasmittenti al di sotto della pavimentazione [11]

Le bobine trasmittenti si attivano automaticamente al passaggio del veicolo e permettono una trasmissione continua di energia grazie ad una tecnica chiamata *Overlap*, aspetto importante per preservare le batterie da discontinuità di alimentazione. Un modulo di ricarica *Enermove* è formato da una coppia di bobine trasmittenti, delle quali è opportunamente gestita l'attivazione, che sono parzialmente sovrapposte (*Overlap*), ottenendo l'alimentazione continua durante il percorso.

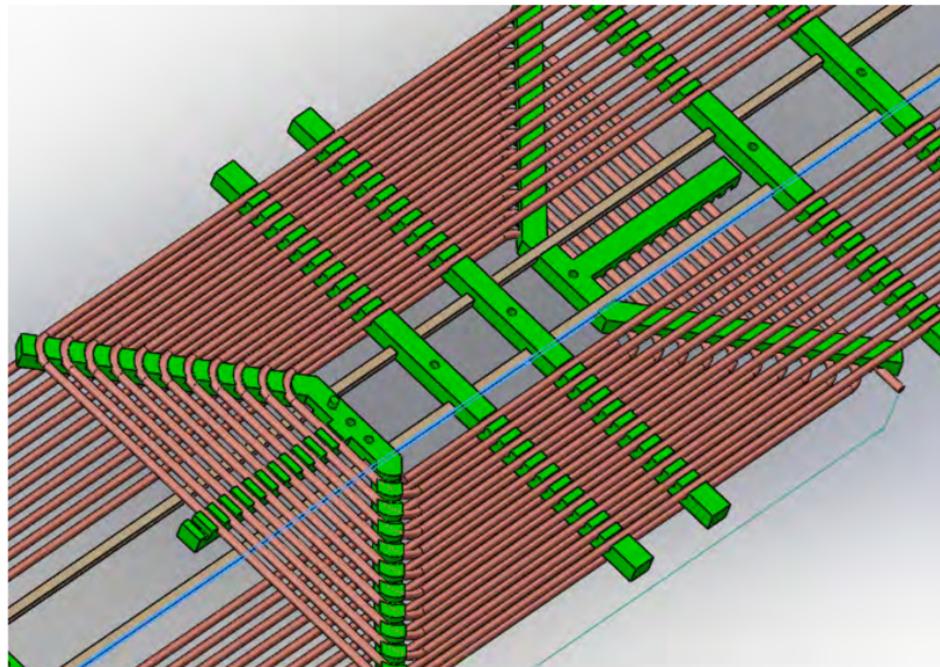


Figura 7 – Rappresentazione CAD di bobine trasmittenti con Overlap [11]

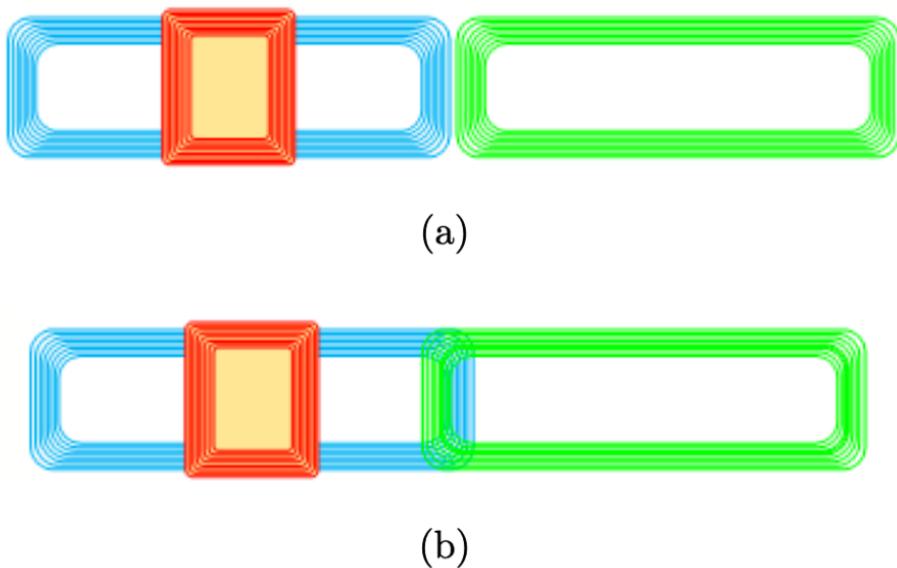


Figura 8 – Disposizione bobine con (b) e senza (a) Overlap, in rosso la ricevente [24]

Per quanto riguarda l'eventuale disallineamento trasversale alla linea di installazione del WPT, il margine di tolleranza è pari al 20% [11], grazie alla differenza dimensionale delle bobine:

- Trasmittenti: lunghezza 1200 mm e larghezza 200 mm.
- Riceventi: quadrata con lati pari a 35 mm.

L'efficienza globale della trasmissione energetica dipenderà quindi dal rispetto dell'allineamento con i percorsi elettrificati durante la guida ed anche dalla tipologia delle operazioni che il veicolo¹⁰ è chiamato a compiere, in quanto passibili di eventuali disallineamenti.

La forma delle bobine trasmittenti è opportunamente studiata anche per minimizzare il concatenamento del campo magnetico indotto in elementi metallici limitrofi, come ad esempio le reti elettrosaldate nel pavimento di calcestruzzo, spesso presente nei capannoni industriali, che comporterebbe perdite d'efficienza riguardo la trasmissione energetica.

L'installazione delle bobine trasmittenti è poco invasiva. Richiede solamente una leggera operazione di scavo $\sim 5\text{ cm}$ nella pavimentazione ove alloggiare la bobina con opportuni accorgimenti tecnici.

Infine, non emergono problematiche relative alla salute degli operatori carrellisti, in quanto la schermatura dal campo magnetico è già garantita dal telaio metallico del carello [11], [31].

¹⁰ Questo aspetto è approfondito nello studio degli scenari del capitolo "Verifica del modello".

2.1.3 WPT: ottimizzazione

Le applicazioni WPT per veicoli hanno la capacità già descritta di poter ricaricare le batterie anche mentre il mezzo è in movimento. Questa caratteristica conduce direttamente alla necessità di analizzare quale sia l'infrastruttura – essenzialmente le bobine trasmittenti – migliore a tale scopo, cioè quella che massimizzi il trasferimento di energia dall'impianto ai veicoli [32]. Questo processo di analisi e ottimizzazione nasce dal fatto che esistono limiti fisici ed economici per i quali non è possibile installare le bobine trasmittenti ovunque i detti veicoli transitano [31]. L'ottimizzazione in sé consiste nella scelta della posizione e della quantità di bobine trasmittenti ideali da installare a questo fine.

L'ottimizzazione dell'infrastruttura WPT è già stata studiata con un approccio prevalentemente focalizzato all'applicazione stradale (out-door) [27]. Non essendoci attualmente ricerche di ottimizzazione dell'allocazione WPT nei magazzini, o nelle applicazioni in-door più in generale, questo lavoro di tesi presenta un caso nuovo.

Il problema della distribuzione del WPT è finora stato studiato con due approcci differenti [27] per poi essere ottimizzata matematicamente:

- Modello di allocazione microscopica (micro-allocazione): ha lo scopo di trovare le posizioni ottimali di installazione delle bobine in casi facilmente descrivibili, ad esempio dato un certo percorso che il veicolo deve compiere. Ne è una dimostrazione il caso dei trasporti pubblici che hanno spesso tragitti preimpostati. Si è quindi in una situazione dove molti parametri determinanti sono più facilmente stimabili, come: profili di velocità, condizioni di traffico e di stop, relativi consumi energetici, etc. I modelli che ne derivano hanno caratteristiche più dettagliate ma una generalità minore, più concernente le peculiarità del sistema in studio, rispetto ai cosiddetti modelli macro-allocazione.
- Modello di allocazione macroscopica (macro-allocazione): analogamente a quanto sopra, ma con una universalità maggiore. In questo caso si guarda ai parametri nelle loro proprietà medie, con un approccio probabilistico. Non si conoscono a priori i percorsi del singolo veicolo ma si possono stimare le corsie scelte più frequentemente, le zone in cui il traffico è più congestionato, valutare i percorsi più utilizzati, etc.

Anche rispetto alla modellizzazione dei sistemi in studio sono stati usati diversi metodi: impiegando variabili continue, oppure discrete.

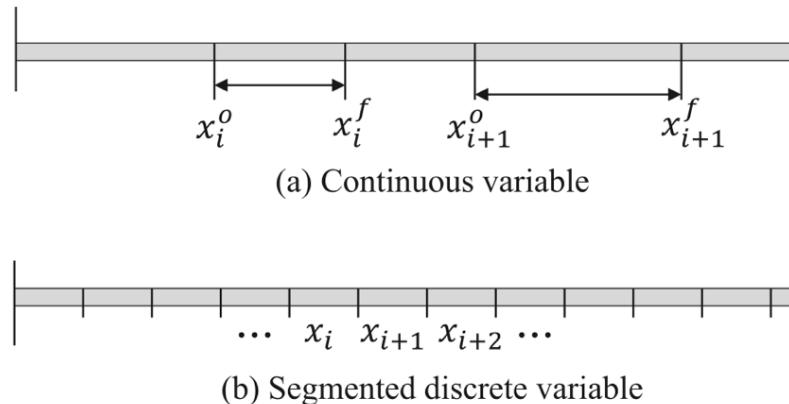


Figura 9 – Modellazione a variabili continue (a) o discrete (b) [27]

Un esempio di modello per questo processo di ottimizzazione è presentato nell'articolo “*Simulation-based Utility Maximization of Wireless Charging*” [33].

Questo studio verte nella modellizzazione della rete stradale ipotizzando come situazioni favorevoli di massimizzazione della carica le intersezioni stradali segnalate, ad esempio regolamentate da semafori, nelle aree urbane. È possibile sfruttare così i frequenti stop e la velocità ridotta per ricaricare le batterie dei veicoli.

Il sistema è quindi studiato sia da un punto di vista micro, nella modellazione degli incroci, delle diverse corsie disponibili, etc., come anche da un punto di vista macro nella determinazione dei carichi di traffico.

La funzione obiettivo pesa i ritardi nelle varie corsie.

Le variabili decisionali che insorgono sono: la posizione e la lunghezza dei moduli che formano le bobine trasmittenti, dette Wireless Charging Units (WCU), e il tempo di fermo semaforico.

Inoltre, il modello ha come vincoli il budget, la locazione, un valore di soglia minimo del tempo con segnale verde ed un parametro “Level of Service” (LOS) che qualifica, rispetto a diversi fattori, la qualità del traffico nella corsia selezionata, con l’obiettivo di ricarica.

Il processo di massimizzazione della carica, condotto utilizzando un algoritmo genetico, determinerà in ogni incrocio quali corsie siano meglio dotare di WCU.

Gli autori, per realizzare il modello, hanno precisato alcuni passi essenziali, che riassumo brevemente:

- Scegliere la porzione d'area d'interesse e la relativa mappa stradale.
- Ottenere tutti i dati possibili riguardo il traffico in quell'area.
- Analizzare i percorsi nella simulazione del traffico, condotta con uno specifico software, ed effettuare i relativi aggiustamenti per l'applicazione al modello.
- Valutare le corsie a ridosso degli incroci con ritardo controllato che hanno i migliori LOS e procedere con l'ottimizzazione.
- Valutare le posizioni e la lunghezza dei WCU da installare e confrontare i risultati per validarli.

Gli autori hanno formalizzato il problema per l'ottimizzazione, come riassunto in seguito.

Funzione di ottimizzazione:

$$\text{Massimizza} \left(\sum_i u_i (l_i, g_i) x_i \right) \text{con } i \in I$$

Vincolato con i parametri descritti in precedenza

Dove,

$I = \text{insieme di tutte le corsie a ridosso delle intersezioni}$

$i = i - \text{esima corsia}$

$u = \text{WCU nell}'i - \text{esima corsia in termini di Wh}$

$l = \text{lunghezza WCU nell}'i - \text{esima corsia}$

$x = \text{valore binario di installazione WCU, installata 1, non installata 0}$

$g = \text{tempo di segnale verde nell}'i - \text{esima corsia}$

L'esempio proposto mostra un metodo per modellizzare matematicamente ed ottimizzare un problema di posizionamento delle bobine trasmittenti WPT in un'applicazione automotive ed in particolare sfruttando quelle zone della rete stradale dove è probabile trascorrere quote di tempo significativo per la ricarica.

Un approccio differente è presentato nell'articolo “*Optimal positioning of dynamic wireless charging infrastructure in a road network for battery electric vehicles*” [34].

Questo lavoro di tesi si propone di realizzare un metodo ed un modello per ottimizzare l'infrastruttura del sistema WPT nelle applicazioni in-door, in particolare nella logistica industriale.

2.2 Ottimizzazione: gli algoritmi genetici

2.2.1 Ottimizzazione

Il concetto di ottimizzazione – o programmazione matematica (PM) – e più in generale la ricerca operativa (RO), si occupa dello sviluppo e dell'applicazione di metodi e modelli per la ricerca di punti di massimo (o minimo) di una funzione matematica nell'opportuno dominio. Spesso si utilizzano le tecniche di ottimizzazione per risolvere problemi decisionali che incorrono nella pratica [35].

I modelli di ottimizzazione descrivono le caratteristiche del sistema in analisi con l'utilizzo di relazioni matematiche. Il processo di realizzazione del modello per un problema di ottimizzazione (PO) si sviluppa in più fasi, che generalmente sono [36]:

- Analisi del problema: si ricercano i legami funzionali e logici del sistema reale, si collezionano dati e si determina l'obiettivo.
- Realizzazione del modello: in questa fase sono formalizzati matematicamente la funzione ed i vincoli, cioè si determina una corrispondenza tra relazioni reali (fisiche, tecniche, economiche, etc.) e relazioni matematiche. In questo frangente è importante, per quanto possibile, mantenere generalità dei parametri immessi per garantire l'applicabilità del modello a più situazioni. Si valuta l'esistenza di una soluzione ottima.
- Ricerca della soluzione numerica: con l'utilizzo di algoritmi di calcolo si ricerca una soluzione quantitativa del problema, cioè si determinano dei valori delle variabili che soddisfano tutti i vincoli e massimizzano (o minimizzano) il valore della funzione di costo.
- Validazione del modello: si analizza la soluzione trovata per affinare ulteriormente il modello se necessario.

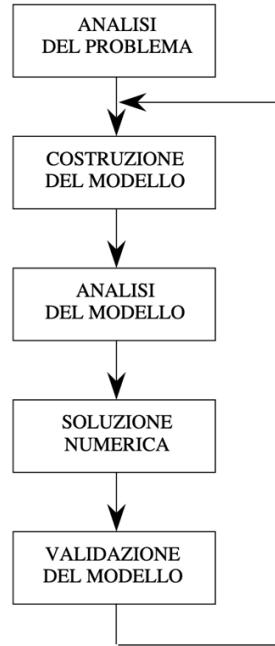


Figura 10 – Processo iterativo di modellazione [37]

Un modello è quindi composto da:

- I parametri che descrivono il sistema.
- Le variabili decisionali, quelle delle quali ricerchiamo il valore ottimo.
- I vincoli: indicano l'insieme delle soluzioni accettabili.
- La funzione obiettivo: cioè la relazione matematica da massimizzare (o minimizzare).

Un modello si presenta nella forma usuale [38]:

$$\text{Minimizzare } f(x)$$

Per,

$$g_i(x) \geq b_i, \quad \forall i$$

Con,

$$x \in S$$

Dove:

x : sono le variabili del problema

$f(x)$: è la funzione obiettivo, detta anche funzione di costo

$g_i(x)$: è la funzione di vincolo

b_i : sono i vincoli

S : è lo spazio di appartenenza delle variabili

Si noti, per generalità, che minimizzare una certa $f(x)$ equivale a massimizzare $-f(x)$.

Tra i modelli di PO hanno particolare importanza i modelli di programmazione lineare (PL), grazie anche alla loro semplicità di risoluzione, nei quali la $f(x)$ e le $g_i(x)$ sono espressioni lineari.

Se almeno una delle funzioni, che sia obiettivo o di vincolo, è non lineare allora il problema è definito come di programmazione non lineare (PNL).

I campi di esistenza delle variabili x_i possono essere, a seconda della modellazione del sistema [39]:

- Continuo (PL): $x \in \mathbb{R}$.
- Intero, spesso non negativo, programmazione lineare intera (PLI) o problemi di ottimizzazione discreta (POD): $x \in \mathbb{Z}^+$.
- Binario, programmazione booleana (PB): $x = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases}$.
- Ci sono poi condizioni miste, si parla allora di programmazione lineare intera mista (PLIM).

2.2.2 Algoritmi Genetici

Come descritto in precedenza, il processo di ottimizzazione si conclude con la ricerca di una soluzione ottima del problema attraverso opportuni algoritmi, oggi sempre più implementati in software dedicati.

Una tipologia di algoritmi che trova moltissime applicazioni, ed anche quella utilizzata in questo lavoro, sono gli algoritmi genetici.

Questi fanno parte della classe degli algoritmi euristici utili per trovare soluzioni, anche approssimate, con una velocità maggiore rispetto ai metodi classici.

Gli algoritmi genetici sono chiamati in questo modo per la loro ispirazione ai processi biochimici che regolano l'evoluzione e la selezione genetica nella biologia. Da essa si riadattano diversi termini [40]:

- *Cromosoma*: Insieme delle variabili decisionali, in genere formata da una stringa di variabili binarie (bit).
- *Popolazione*: insieme delle soluzioni al problema.
- *Gene*: è parte del cromosoma, indica una variabile decisionale cioè uno o più bit.
- *Allele*: valore della variabile decisionale.
- *Genotipo*: insieme dei geni, soluzione ammissibile.
- *Fitness*: valuta la qualità della funzione obiettivo attraverso una funzione detta di fitness che, in analogia alla biologia, indica la capacità di adattamento all'ambiente dell'individuo.
- *Crossover*: “accoppiamento”, genera una soluzione mescolando quelle esistenti.
- *Mutazione*: alterazione casuale di una soluzione.
- *Selezione naturale*: algoritmo.
- *Generazione* o iterazione: si intende l'introduzione nella popolazione di nuovi individui, i figli.

L'algoritmo procede tentando di far evolvere la popolazione (di soluzioni), con un certo processo di selezione, verso soluzioni con buoni valori di fitness [41]:

1. L'algoritmo parte da una popolazione iniziale, casuale, di soluzioni (gli individui o cromosomi).
2. Valuta la fitness dei singoli cromosomi (individui) di questa popolazione, cioè quelli che si adattano meglio all'obiettivo richiesto e seleziona gli individui con la fitness migliore.

3. Effettua il crossover legando, con una certa tecnica, diverse parti del cromosoma (geni) da due individui diversi, detti genitori, creando soluzioni ibride dette figli (individui figli).
4. Una volta generati i figli effettua una mutazione su alcuni di questi per considerare gli effetti dell'ambiente. Questo per sopperire al fatto che, almeno in parte, i potrebbero perdere delle soluzioni ottime nella fase precedente, portando l'algoritmo verso soluzioni di ottimo locale.
5. Forma quindi una nuova popolazione.
6. A questo punto ritorna alla valutazione del fitness (punto 2) e continua l'iterazione.

In particolare, il crossover consiste nel rimescolamento dei geni degli individui genitori, viene applicato con un alta probabilità nella popolazione. Ne esistono diverse tecniche, ad esempio:

- Single-point crossover: in due genitori il cromosoma è tagliato ad una certa distanza e scambiato dopo il punto di taglio.

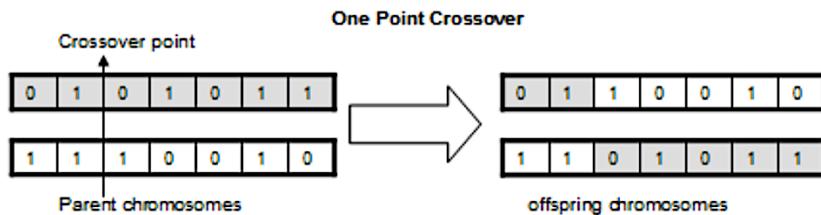


Figura 11 – Esempio di Single-point Crossover [42]

- Two-points crossover: sempre partendo dai cromosomi di due genitori, si scelgono due punti e si scambia la parte compresa tra i punti.

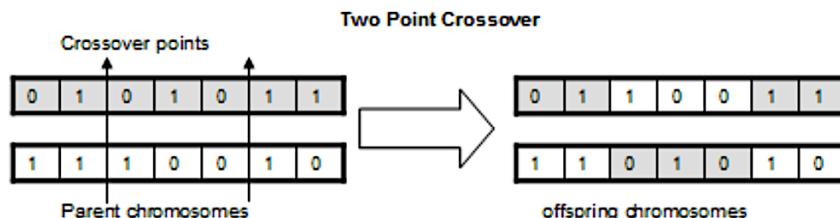


Figura 12 – Esempio di Two-points Crossover [42]

Invece, il processo di mutazione modifica casualmente il valore di un gene all'interno di un cromosoma, quindi ad esempio variando il valore di una variabile binaria di un individuo.

mutation point →
Original string - 0 0 **0** 1 1 0 0 0 1 0
Mutated string - 0 0 **1** 1 1 0 0 0 1 0

Figura 13 – Esempio di mutazione [43]

Per l'ottimizzazione del modello realizzato in questa ricerca è stato utilizzato un algoritmo genetico implementato in ambiente *Matlab* [44], [45], [46, 46].

3. Metodo, modello e ottimizzazione. Caso di studio *Enermove*

3.1 Metodo

Lo sviluppo di una metodologia per la sintesi dei componenti infrastrutturali degli impianti di ricarica dinamica forniti dall'azienda *Enermove* passa attraverso la valutazione statistica dei profili di carica e scarica dei veicoli adottati.

Questi profili sono intimamente correlati alle caratteristiche dei veicoli, dell'impianto e del magazzino, unitamente alle caratteristiche gestionali quali turnazioni, logica di magazzino, etc. Parametri con i quali è possibile correlare i tempi di ricarica-scarica al tempo di permanenza medio dei veicoli in collegamento all'impianto e determinare quindi il dimensionamento del sistema.

Per investigare la problematica relativa all'analisi statistica dei tempi nei quali i veicoli occupano una certa posizione nel magazzino si impiega un approccio matriciale.

Ogni matrice descrive una certa caratteristica di una data posizione all'interno del magazzino.

La descrizione statistica delle posizioni dei veicoli nel tempo da un'indicazione primaria delle posizioni ottime topologiche e quantitative dove installare le bobine dell'impianto in questione, scegliendo in pratica in quali celle installare le bobine di ricarica.

In un primo approccio sintetico, la metodologia realizzata si sviluppa come segue:

1. Discretizzare la pianta del magazzino interessata dal transito dei veicoli in aree rettangolari di dimensioni idonee a non appesantire il calcolo, ma che descrivano il sistema con una buona approssimazione rispetto alla realtà. Si consiglia una dimensione multipla del modulo WPT, costituito dalla coppia di bobine che misura 2,5 m circa.
2. Calcolare il tempo di raggiungimento di ogni ubica e rientro per poter valutare la relativa percentuale di tempo con copertura WPT. In questa fase, per ogni cella è calcolato il tempo di raggiungimento medio. Nel caso presentato in seguito i percorsi possibili per il raggiungimento di una cella sono univoci, diversamente, se vi fossero più possibili percorsi sarebbero da considerare le relative probabilità di avvenimento per farne una media pesata ed assegnare il valore ottenuto alla cella.
3. Aggiungere i tempi di operazione in ogni ubica, considerando difficoltà di movimentazione del particolare prodotto o altezza dello scaffale, ed eventuali altri parametri che incidono sul tempo medio di operazione.

4. Moltiplicare, termine a termine, la matrice dei tempi totali e quella di permanenza senza WPT di ogni ubica, per la probabilità di effettuarci un'operazione, espressa in percentuale. Si pesa così ogni ubica in base ad un fattore gestionale che considera: i prodotti che hanno più ricambio-venduti, sono movimentati in più manovre, etc.
5. Calcolare il tempo totale e quello trascorso sul WPT.
6. Valutarne la percentuale di tempo in ricarica tenendo conto dell'efficienza di ricarica, livelli di carica iniziali e consumi.

Nei capitoli seguenti, la metodologia è descritta con maggior dettaglio.

3.1.1 Discretizzazione

Per creare il metodo ed il relativo modello matematico è stato utilizzato un semplice esempio di magazzino, descritto in seguito, ed utilizzato come esempio applicativo di studio.

La modellazione parte dalla pianta del magazzino del cliente, da cui sono estrapolate le aree interessate dal passaggio dei veicoli – area utile -. L'area estratta è discretizzata in porzioni rettangolari, il più possibile regolari, dette ubiche o celle.

Questo processo trova la sua utilità in seguito, quando sono assegnati dei parametri che rappresentino le caratteristiche di quella porzione di area (ubica).

È stato scelto questo approccio matriciale consentendo così di visualizzare le caratteristiche che distinguono le differenti aree dell'impianto, facendo attenzione anche agli aspetti topologici.

Nell'esempio di magazzino utilizzato per costruire il metodo vi è una sola banchina di carico-scarico, l'area utile è composta da un corridoio orizzontale e 10 corsie tra gli scaffali (gli scaffali sono rappresentati in verde nella planimetria).

Le due zone sono collegate da un varco al centro della banchina con una larghezza pari all'ubica adiacente.

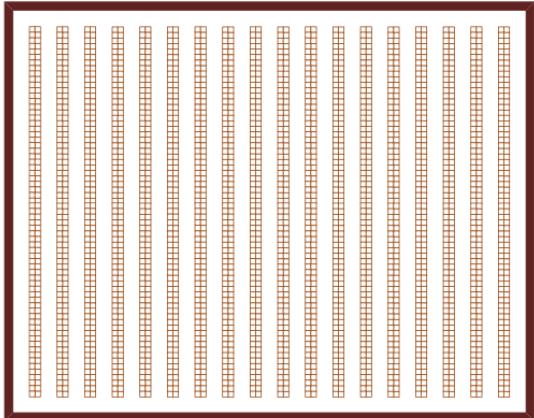
Per vanificare la possibile interazione con l'uomo del campo elettromagnetico creato dal WPT si è ipotizzato, almeno inizialmente, che nella banchina vi siano solo stazioni di ricarica statica per i veicoli, utilizzabili anche durante eventuali operazioni di preparazione alla movimentazione merci o nelle pause [47].

L'area scaffali è invece misurata e divisa in aree discrete al fine di assegnare ad ogni zona le sue caratteristiche.

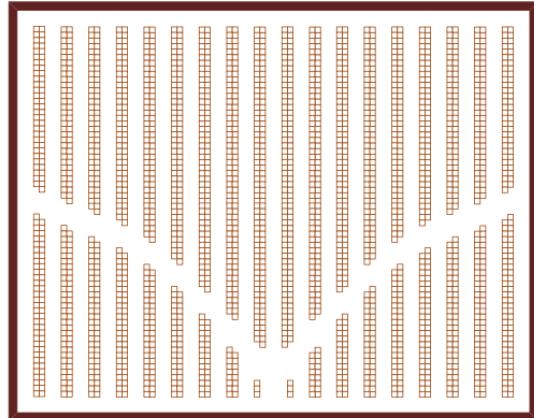
Si noti che, in questo semplice magazzino di esempio utilizzato per la costruzione del modello, gli scaffali sono disposti con una modalità regolare molto utilizzata, a file parallele. Nella Figura 14, in seguito, sono visibili alcuni layout per magazzini, tra questi “Traditional layout 1” è quello utilizzato per modellare il problema.

Inoltre si consideri che gli scaffali si estendono fino al fondo alla corsia di passaggio dei veicoli, per cui sarà possibile considerare ingressi ed uscite nelle varie corsie solamente tramite il corridoio trasversale di collegamento tra la zona scaffali e la banchina di servizio, in seguito questo aspetto è approfondito (si veda Figura 19 – Metodi per la scelta dei percorsi per i veicoli logistici nei magazzini).

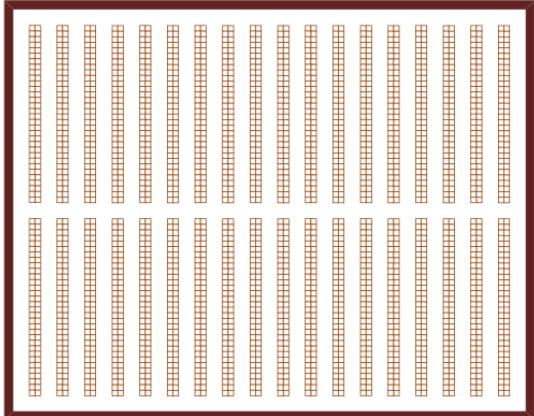
Traditional Layout 1



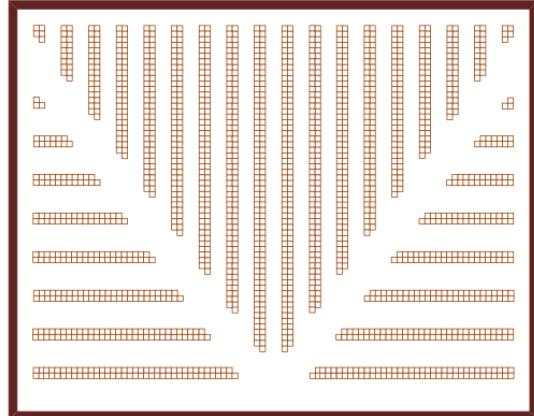
Flying-V Layout



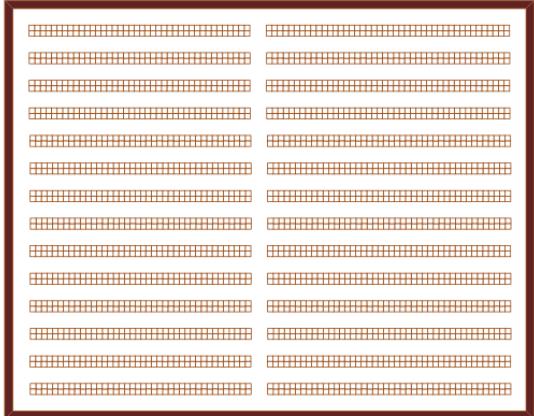
Traditional Layout 2



Fishbone Layout



Traditional Layout 3



Inverted-V Layout

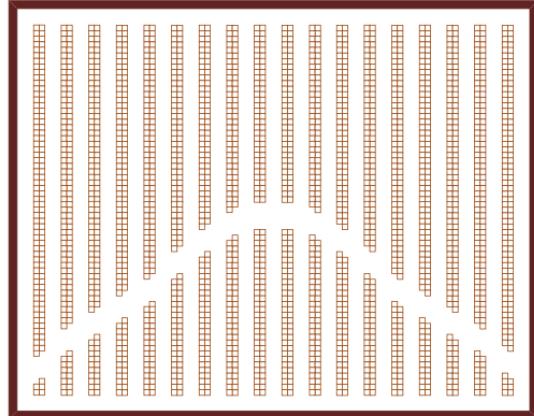


Figura 14 – Esempi di layout per scaffali nei magazzini [48]

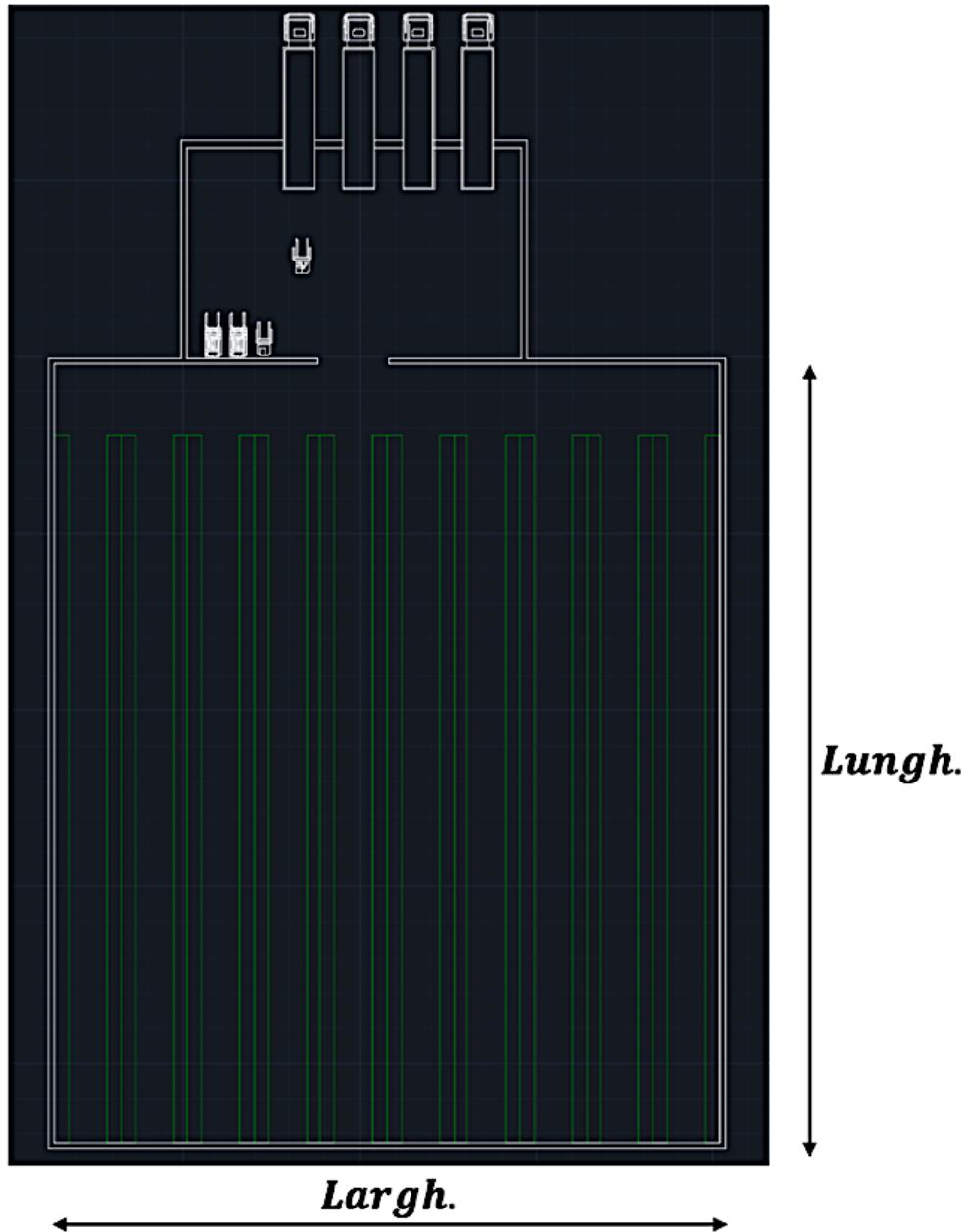


Figura 15– Esempio di pianta di un magazzino con indicazione grandezze

Una volta ottenuta la parte utile della planimetria e le relative misure dello stabilimento in esame, è necessario ipotizzare un valore medio verticale ed orizzontale delle dimensioni delle celle. Il valore di ipotesi delle dimensioni della cella di discretizzazione (x, y), è valutato con un multiplo intero del modulo WPT della coppia di bobine, pari a circa 2,5 m. Nell'esempio si è scelto 5 m.

Si dividono le dimensioni totali verticale ed orizzontale del magazzino, ottenendo il numero di celle verticali (l) ed orizzontali (m):

$$l = \frac{\text{lunghezza magazzino (Lu)}}{\text{lunghezza ipotizzata cella media (x)}}$$

Equazione (1) – Quantificazione celle

$$m = \frac{\text{larghezza magazzino (La)}}{\text{larghezza ipotizzata cella media (y)}}$$

Per cui si ottengono delle matrici $l \cdot m$ dove la coppia di indici i, j individua la cella a cui si fa riferimento.

$$ij = \begin{bmatrix} 0,1 & \dots & 0,m \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ l,1 & \dots & l,m \end{bmatrix}$$

Equazione (2) – Matrice indici

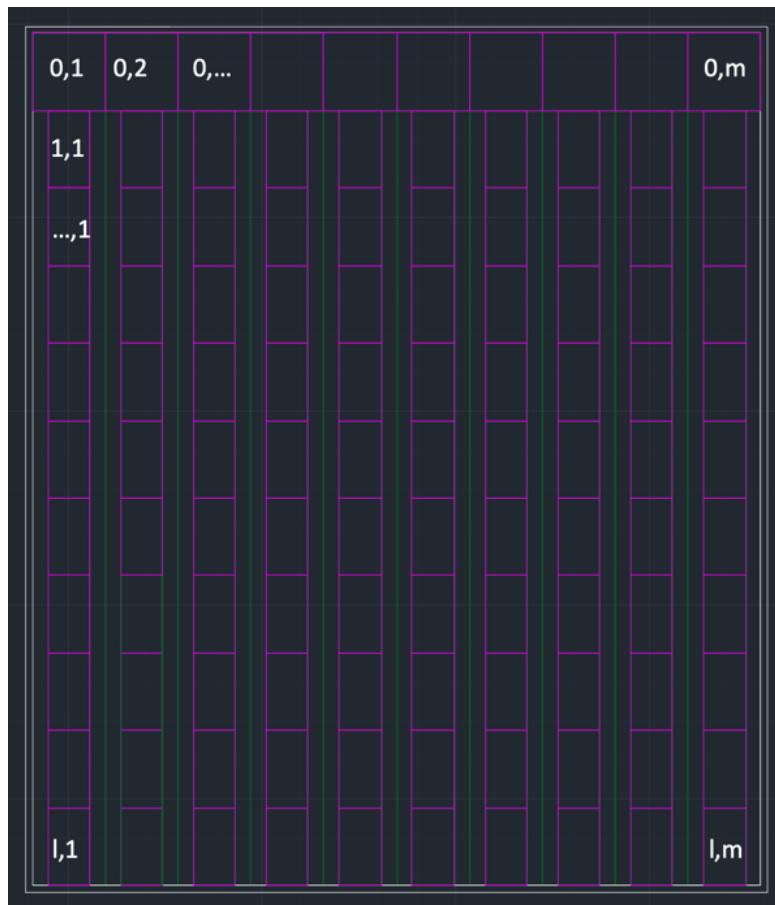


Figura 16 – Applicazione degli indici delle celle di discretizzazione in pianta

Nell'esempio presentato si ha una lunghezza del magazzino pari a **54 m** ed una larghezza dello stesso di **50 m**:

$$l = \frac{54 \text{ m}}{5 \text{ m}} \cong 11 \quad \& \quad m = \frac{50 \text{ m}}{5 \text{ m}} = 10 \quad \text{Equazione (1) - Quantificazione celle}$$

Risulteranno perciò matrici di 11 righe e 10 colonne utili a descrivere il magazzino.

A questo punto si fanno degli aggiustamenti sui valori delle dimensioni delle singole celle per adattare l'estensione media ipotizzata inizialmente alla realtà, facendole coincidere.

Ad esempio, si può notare che nel caso di studio è stata ridotta la larghezza delle celle all'interno del magazzino, poiché l'effettiva area percorribile dai carrelli risulta minore di 5 m in quanto in parte occupata dagli scaffali. Ragionamenti analoghi sono stati condotti per tutte le dimensioni, arrivando infine ad elaborare le prime due matrici, delle lunghezze \mathbf{L}_u e larghezze \mathbf{L}_a di ogni ubica:

$$\mathbf{L}_a = \begin{bmatrix} l_{a,0,1} & \cdots & l_{a,0,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{a,l,1} & \cdots & l_{a,l,m} \end{bmatrix}$$

Equazione (3) – Matrici delle dimensioni

$$\mathbf{L}_u = \begin{bmatrix} l_{u,0,1} & \cdots & l_{u,0,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{u,l,1} & \cdots & l_{u,l,m} \end{bmatrix}$$

Dalla tabella in seguito si nota che in questo magazzino semplice con cui si è costruito il modello, l'utilizzo di due pedici, quindi di una matrice, ha permesso di visualizzare direttamente nelle matrici le caratteristiche presenti nelle diverse porzioni di pianta del magazzino.

È possibile, infatti, sovrascrivere le matrici alla pianta stessa, ottenendo una mappa di caratteristiche utili al fine della realizzazione del modello matematico ricercato.

	BANCHINA									
0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
1	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
2	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
3	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
4	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
5	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
6	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
7	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
8	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
9	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
10	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Celle	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Matrice 1 – Pianta-matrice indicativa della proprietà di visualizzazione data dalle matrici

Da questa mappa-matrice con indicazione della numerazione dei pedici delle differenti celle e dell'indicazione della posizione della banchina, si estrapola la matrice utile al fine dei calcoli.

A titolo di esempio è presentata la *matrice delle lunghezze*.

$$\mathbf{L}_u = \begin{array}{|cccccccccc|} \hline & 4,0 & 4,0 & 4,0 & 4,0 & 4,0 & 4,0 & 4,0 & 4,0 & 4,0 & 4,0 \\ \hline 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 \\ 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 \\ 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 \\ 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 \\ 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 \\ 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 \\ 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 \\ 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 \\ 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 \\ \hline \end{array}$$

Matrice 2 – Lunghezze delle celle [m]

Ed analogamente è stata costruita la matrice delle larghezze delle ubiche.

$$\mathbf{L}_a = \begin{bmatrix} 4,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 5,0 & 4,0 \\ 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 \\ 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 \\ 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 \\ 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 \\ 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 \\ 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 \\ 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 \\ 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 \\ 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 & 3,0 \end{bmatrix}$$

Matrice 3 – Larghezza delle ubiche [m]

3.1.2 Parametri

In questo paragrafo si ripercorre tutto il processo di scelta dei parametri e delle variabili di cui si è tenuto conto nella costruzione del modello matematico. Sono assegnate quindi le caratteristiche che definiscono le specificità del magazzino in esame.

In primo luogo è indicata la probabilità che sia necessario raggiungere una certa cella per accantonare o approvvigionarsi di un collo in uno scaffale limitrofo alla stessa, nella generica operazione, formando, con questi valori, la matrice della logica di stoccaggio \mathbf{P} .

Il valore assegnato ad una cella cresce se il prodotto li immagazzinato è più richiesto (alte vendite), se ha necessità di più operazioni per essere movimentato, se gli operatori sviluppano abitudini di utilizzo maggiore di certe zone, etc.

Logicamente, la sommatoria delle probabilità indicate in tutte le celle è pari al 100%.

Nel caso in cui ci sia, ad esempio, una logica di magazzino costante, si avrebbe nelle diverse celle lo stesso valore di probabilità, che risulta pari ad una frazione della probabilità totale, cioè 100% diviso per il numero di celle:

$$p_{ij} = \frac{1}{n} \quad \forall ij, \quad \text{con } n = (l - 1) \cdot m \quad \text{Equazione (4) - Probabilità costante}$$

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_{0,1} & \cdots & p_{0,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{l,1} & \cdots & p_{l,m} \end{bmatrix} \quad \text{Equazione (5) - Matrice delle probabilità}$$

Nel caso pratico d'esempio si è ipotizzata, tra le altre, una matrice delle probabilità di operazione, nella quale le zone più vicine alla banchina hanno una probabilità di essere visitate all'incirca doppia delle celle più lontane.

Questa ipotesi è stata considerata siccome, in genere, ci sono prodotti più movimentati e altri meno all'interno di un magazzino. Stivando quindi i prodotti più trasportati vicino alla banchina si accorciano i tempi di operazione per approvvigionarsi degli stessi, diminuendo le distanze da percorrere.

In particolare, un prodotto più venduto sarà integrato nel magazzino e uscirà poi dallo stesso con una frequenza maggiore, corrispondendo quindi ad una probabilità maggiore di andare nella zona di lavoro limitrofa al suo scaffale di stiva.

P =	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013
	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013
	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007
	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007

Matrice 4 – Probabilità di stoccaggio [-]

Ipotizzando ora una velocità media di percorrenza dei veicoli v e stimando le traiettorie tipiche, pesate sulle probabilità di realizzarsi, per ogni tipo di percorso, è possibile calcolare il tempo di attraversamento medio delle celle, redigendo quindi la matrice dei tempi di attraversamento delle ubiche \bar{T}_a .

$$\bar{T}_a = \begin{bmatrix} \bar{t}_{a_{0,1}} & \cdots & \bar{t}_{a_{0,m}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{t}_{a_{l,1}} & \cdots & \bar{t}_{a_{l,m}} \end{bmatrix} \quad \text{Equazione (6) – Tempi di attraversamento medi}$$

Nell’i,j-esima cella il calcolo risulta il seguente, dove la traiettoria percorsa per attraversare la cella è divisa per la velocità media del veicolo, ottenendo quindi il tempo impiegato per l’attraversamento della cella. In seguito è mostrato qualche esempio nel caso vi siano più traiettorie possibili all’interno della stessa cella, per cui i diversi valori sono pesati sulla probabilità di avvenimento.

$$\bar{t}_{a_{ij}} = \frac{t_{r_{ij}}}{\bar{v}} \quad \text{Equazione (7) – Tempo di percorrenza cella}$$

Le traiettorie in genere sono le dimensioni dei segmenti verticale od orizzontale per il solo attraversamento dell’ubica, che corrispondono quindi alla larghezza o lunghezza della cella stessa in base alla direzione del transito.

$$t_{r_{ij}} = \begin{cases} l_{u_{ij}}, & \text{transito verticale} \\ l_{a_{ij}}, & \text{transito orizzontale} \\ l_{x_{ij}}, & \text{caso particolare} \end{cases}$$

Equazione (8) – Dimensione di attraversamento cella

Vi sono casi particolari in cui la lunghezza della traiettoria percorsa varia in funzione delle caratteristiche topologiche e del tragitto.

Facendo riferimento al caso di studio, la matrice redatta risulta la Matrice 5.

Si nota, tra gli altri casi particolari, che per l'attraversamento delle celle [0,1] e [0,10] è ipotizzata una curva di percorrenza che corrisponde ad un arco di cerchio sotteso ad un angolo (θ) di 90°, con raggio pari a metà della dimensione massima dell'ubica, sia in entrata che in uscita dalla corsia. Il raggio è calcolato quindi appunto come il valore massimo tra la larghezza e la lunghezza della cella, diviso per due e moltiplicato per l'angolo di apertura della curva, cioè pari a $\frac{\pi}{2}$.

$$t_{r_{ij}} = r_{ij} \cdot \theta, \quad \text{con } \theta = 90^\circ, \quad r_{ij} = \frac{\max(l_{a_{ij}}, l_{u_{ij}})}{2}$$

Equazione (9) – Traiettoria ad arco di circonferenza

Nelle celle descriventi l'area del corridoio trasversale di collegamento scaffali–banchina si evidenziano più possibili tipi di attraversamento delle stesse. Le diverse tipologie di traiettorie sono quindi pesate sulla probabilità di concretizzarsi, basandosi sulla sommatoria delle probabilità delle zone da raggiungere.

In particolare, per la cella adiacente al varco, in generale indicata con i pedici $[0, j_{ban}]$, in questo caso [0,5], ci sono 2 possibili percorsi, traslazione dall'alto verso il basso (e viceversa), oppure curva e traslazione (e viceversa) calcolati analogamente a quanto fatto in precedenza.

Il valore ottenuto è stato poi pesato sulla probabilità che si effettui quella traiettoria.

La probabilità di effettuare il percorso verso il basso è la somma delle probabilità di effettuare un'operazione nelle ubiche della corsia adiacente, la j_{ban} :

$$p_{j_{ban}} = \sum_{i=1}^l p_{i,j_{ban}} = 0,10$$

Equazione (10) – Probabilità di operazione in una corsia

La probabilità di effettuare l'altra tipologia di percorso risulta il complemento ad 1 della ricorrenza della prima traiettoria, da cui il calcolo che ne risulta è il seguente: somma dei tempi per effettuare un certo tipo di traiettoria in quella cella moltiplicati la probabilità di effettuarli.

$$\bar{t}_{a0,j_{ban}} = 2,40 \cdot p_{j_{ban}} + 2,96 \cdot (1 - p_{j_{ban}}) = 2,90 \text{ s} \quad \begin{array}{l} \text{Equazione (11) - Tempo di attraversamento medio} \\ \text{pesato} \end{array}$$

Come ultimo caso particolare, sempre rispetto alle celle che descrivono il corridoio orizzontale, si definiscono 2 possibili percorsi:

- Uscendo dalla corsia con una curva (o rientrandovi).
- Attraversamento orizzontale per l'intera lunghezza (in entrambe le direzioni).

Anche in questo caso si è proceduto analogamente a quanto fatto in precedenza, pesando i diversi percorsi sulle probabilità di evento.

Per semplicità è stato effettuato un unico calcolo considerando gli stessi valori di probabilità ed assegnando a tutte lo stesso valore ottenuto, osservando che comunque è una buona approssimazione.

Si ottiene infine la matrice ricercata dei tempi di percorrenza delle celle.

$\bar{T}_a =$	2,36	3,11	3,11	3,11	2,90	3,11	3,11	3,11	3,11	2,36
	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

Matrice 5 – Tempi di percorrenza [s]

È stata realizzata, inoltre, una terza matrice dimensionale H dove è indicato un coefficiente che pesa l'effetto dell'altezza media degli scaffali sul tempo medio per effettuare un'operazione in quell'ubica.

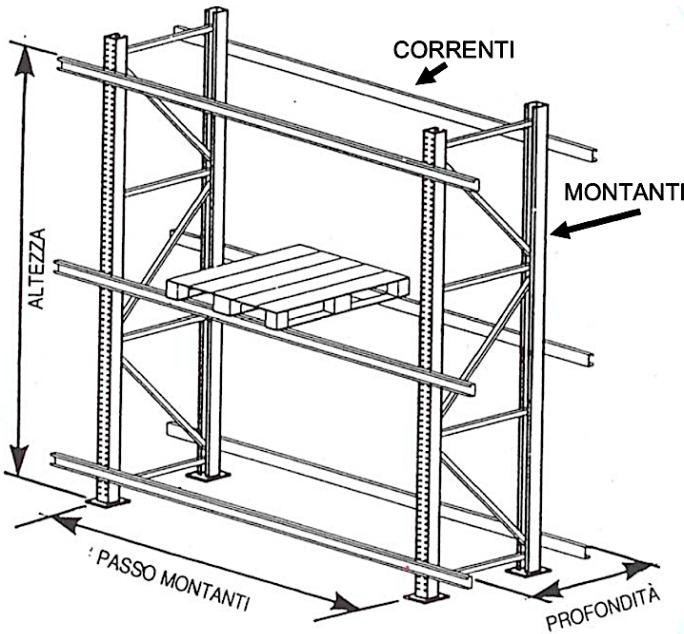


Figura 17 – Dimensioni scaffalatura [49]

Ad esempio, con metà magazzino adibita con scaffali alti il doppio, il coefficiente moltiplicativo del tempo impiegato nell'operazione media si stima essere una 1,5 volte il tempo medio di quello per gli scaffali standard.

Moltiplicando questa matrice per un tempo medio di operazione (ipotizzato pari a $\bar{T}_{hp} = 40 \text{ s}$ nell'esempio) si ottiene una matrice \bar{T}_o nella quale sono assegnati i tempi medi per effettuare un'operazione in una certa cella.

$$\bar{t}_{oij} = h_{ij} \cdot \bar{T}_{hp}$$

Equazione (12) – Tempo medio di operazione

$$H = \begin{bmatrix} h_{0,1} & \cdots & h_{0,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{l,1} & \cdots & h_{l,m} \end{bmatrix}$$

Equazione (13) – Matrice delle altezze

	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
H =	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Matrice 6 – Altezze scaffali adiacenti all’ubica [-]

$$\bar{T}_o = \begin{bmatrix} \bar{t}_{o_{0,1}} & \cdots & \bar{t}_{o_{0,m}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{t}_{o_{l,1}} & \cdots & \bar{t}_{o_{l,m}} \end{bmatrix} \quad \text{Equazione (14) – Matrice dei tempi medi di operazione}$$

	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
T_o =	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40

Matrice 7 – Tempi di permanenza su ubica per operazione agli scaffali [s]

In seguito, nei calcoli del caso presentato è stata utilizzata un’altezza costante degli scaffali, corrispondenti ad un valore pari ad 1, in tutto il magazzino.

A questo punto si introduce la matrice W che descrive le posizioni di installazione dei moduli WPT. È imposto 1 dove è presente il modulo di ricarica e 0 dove non è installato.

Questa risulta utile inizialmente per il calcolo di tempi e quote di copertura con collegamento al sistema di ricarica, poi per ottimizzare il modello matematico al fine di individuare il numero e la posizione dei moduli che soddisfano le richieste del cliente.

$$w_{ij} = \{0, 1\} \in \mathbb{Z}$$

Equazione (15) – Ubiche con/senza WPT

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} w_{0,1} & \cdots & w_{0,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{l,1} & \cdots & w_{l,m} \end{bmatrix}$$

Equazione (16) – Matrice posizioni WPT

$$\mathbf{W} = \boxed{\begin{array}{cccccccccc|c} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array}}$$

Matrice 8 – Posizioni delle coppie di bobine WPT [valori binari]

Il numero totale di celle con coppia di bobine WPT installate risulta quindi la sommatoria sui due indici di tutti i valori di posizione, cioè la matrice \mathbf{W} .

$$n_{celle.WPT} = \sum_{i=0}^l \sum_{j=1}^m w_{ij}$$

Equazione (17) – Totale WPT installate

Si può calcolare la percentuale di area dotata di bobine di ricarica, facendo un semplice rapporto tra il valore appena calcolato, cioè il numero di celle con WPT e il numero di celle totale con cui si è discretizzata l'area del magazzino.

Nell'esempio presentato sono installate bobine in 43 celle su 110.

$$WPT_{area} = \frac{\sum_{i=0}^l \sum_{j=1}^m w_{ij}}{l \cdot m} = \frac{43}{110} = 39,09 \%$$

Equazione (18) – Percentuale di area con WPT sul totale

In seguito, è presentato, a solo titolo illustrativo, un esempio di pianta – in scala – con vista dall’alto di un magazzino con l’impianto di ricarica dinamica esteso per il 50% dell’area scaffali e 4 stazioni di ricarica statica nell’area della banchina.

In verde si notano gli scaffali, in rosso l’impianto di ricarica dinamica, in arancio le bobine di ricarica statica, mentre in bianco sono rappresentati il magazzino ed i veicoli.

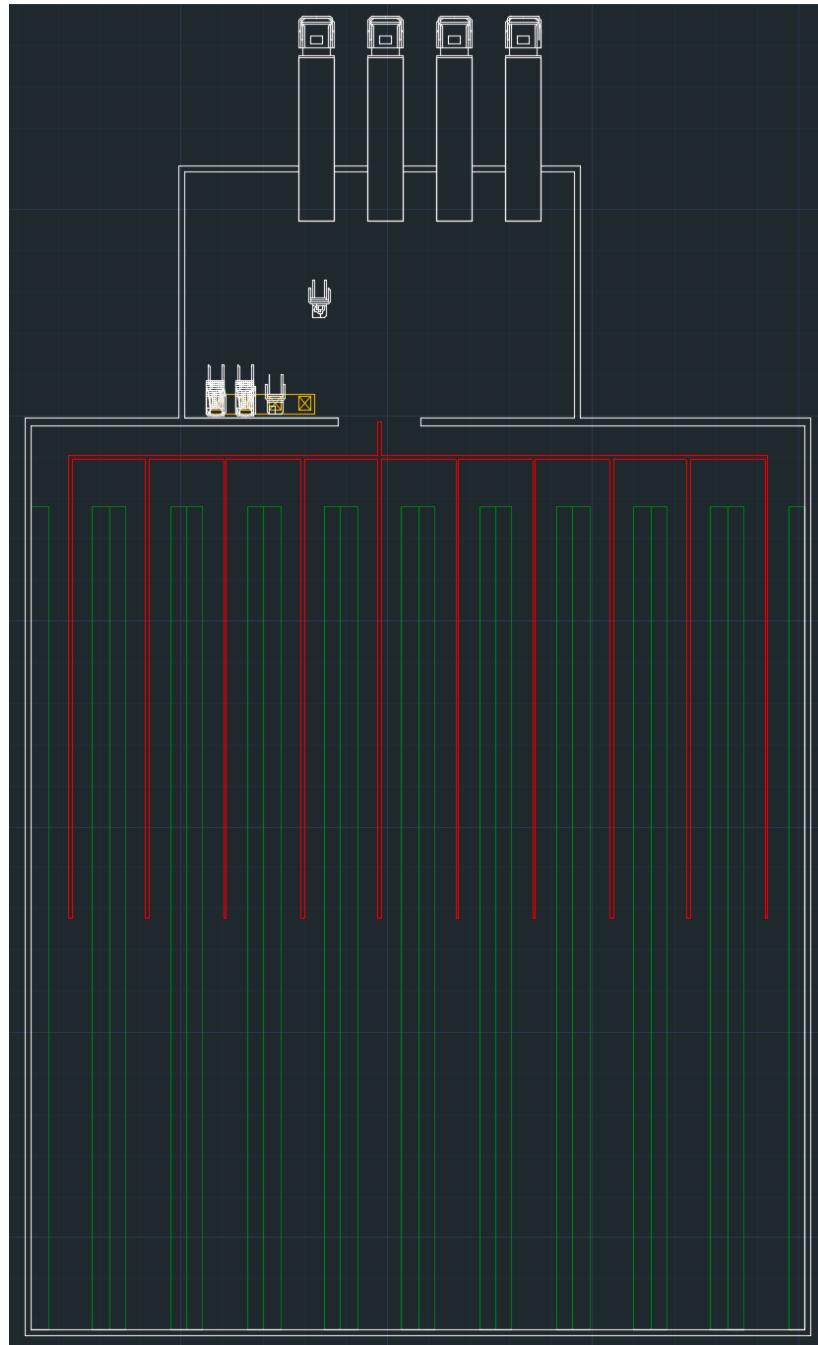


Figura 18 – Pianta di magazzino con impianto WPT esteso per il 50% dell’area scaffali

Risulta ragionevole installare le bobine a ridosso dell'area banchina, dove per ogni operazione è sicuramente necessario transitarvi.

Poi via via allontanare il montaggio verso zone dove la probabilità di raggiungimento cala – in questo tipo di magazzino proporzionalmente alla distanza –.

Questo risultato è ottenuto in considerazione del fatto che i percorsi possibili in questa modellazione sono del tipo “Return” visibile in Figura 19, dove entrata e uscita in e da una corsia risulta effettuato dallo stesso lato della corsia stessa.

Ne consegue, quindi, che le posizioni dove si ha più probabilità di transitare, ovverosia dove vi è più tempo potenziale per la ricarica dinamica, sono quelle a partire dalla banchina, come già indicato.

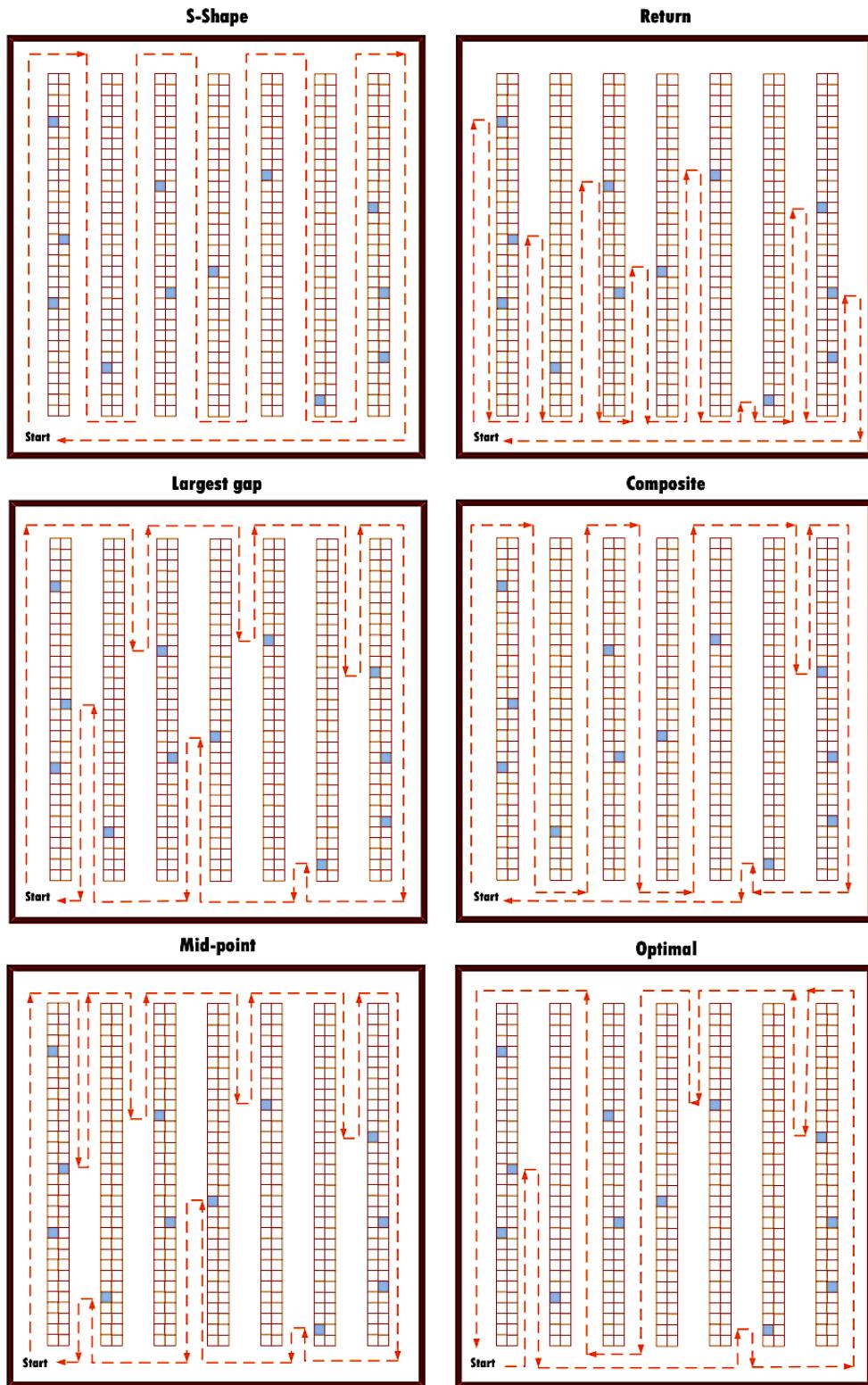


Figura 19 – Metodi per la scelta dei percorsi per i veicoli logistici nei magazzini [48]

A maggior riprova di questo risultato, nel capitolo “Conclusioni” è descritta la matrice delle sommatorie delle probabilità, che da un’indicazione analoga a quanto appena descritto.

Grazie ai parametri realizzati, è ora possibile costruire una prima matrice che consideri aspetti incrociati tra le differenti celle.

Innanzitutto si realizza la matrice del tempo globale di operazione in una cella $\bar{\mathbf{T}}_t$, che considera:

- Il tempo di percorrenza dalla banchina all'ubica in questione, sommando tutte i tempi di attraversamento delle ubiche percorse. Per questo calcolo si nota dall'equazione che sono sommati tutti i tempi di percorrenza delle celle attraversate nel corridoio e nella corsia dove si trova l'ubica da raggiungere fino alla cella interessata.
- Il tempo di operazione allo scaffale.
- Il tempo di rientro tramite le stesse ubiche dell'andata.

$$\bar{t}_{t_{ij}} = \begin{cases} 2 \cdot \left(\sum_{j=j_{ban}}^{j_{in}} \bar{t}_{a_{0j}} + \sum_{i=1}^{i_{fin}} \bar{t}_{a_{ij_{in}}} \right) + \bar{t}_{o_{ij}}, & j_{ban} < j_{in} \\ 2 \cdot \sum_{i=0}^{i=i_{fin}} \bar{t}_{a_{ij_{ban}}} + \bar{t}_{o_{ij}}, & j_{ban} = j_{in} \\ 2 \cdot \left(\sum_{j=j_{in}}^{j_{ban}} \bar{t}_{a_{0j}} + \sum_{i=1}^{i_{fin}} \bar{t}_{a_{ij_{in}}} \right) + \bar{t}_{o_{ij}}, & j_{ban} > j_{in} \end{cases}$$

Equazione (19) – Tempi totali di operazione e percorrenza

Con:

- $j_{ban} = \text{secondo indice della posizione del varco banchina}$
- $j_{in} = \text{secondo indice della cella interessata dall'operazione}$
- $i_{fin} = \text{primo indice della cella interessata dall'operazione}$

$$\bar{\mathbf{T}}_t = \begin{bmatrix} \bar{t}_{t_{0,1}} & \cdots & \bar{t}_{t_{0,m}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{t}_{t_{l,1}} & \cdots & \bar{t}_{t_{l,m}} \end{bmatrix}$$

Equazione (20) – Matrice dei tempi totali di operazione e percorrenza

$\bar{T}_t =$	29,16	24,45	18,23	12,02	5,80	12,02	18,23	24,45	30,67	35,38
	75,16	70,45	64,23	58,02	51,80	58,02	64,23	70,45	76,67	81,38
	81,16	76,45	70,23	64,02	57,80	64,02	70,23	76,45	82,67	87,38
	87,16	82,45	76,23	70,02	63,80	70,02	76,23	82,45	88,67	93,38
	93,16	88,45	82,23	76,02	69,80	76,02	82,23	88,45	94,67	99,38
	99,16	94,45	88,23	82,02	75,80	82,02	88,23	94,45	100,67	105,38
	105,16	100,45	94,23	88,02	81,80	88,02	94,23	100,45	106,67	111,38
	111,16	106,45	100,23	94,02	87,80	94,02	100,23	106,45	112,67	117,38
	117,16	112,45	106,23	100,02	93,80	100,02	106,23	112,45	118,67	123,38
	123,16	118,45	112,23	106,02	99,80	106,02	112,23	118,45	124,67	129,38
	129,16	124,45	118,23	112,02	105,80	112,02	118,23	124,45	130,67	135,38

Matrice 9 – Tempi totali di operazione agli scaffali e percorrenza [s]

Costruita analogamente a questa, la matrice dei tempi complessivi di operazione coperto da WPT \bar{T}_{tw} , descrive la quota di tempo complessivo, per effettuare un’operazione in una certa ubica, durante il quale il veicolo si trova collegato all’impianto di ricarica dinamica.

Si può notare che ogni termine delle sommatorie è moltiplicato per i valori w_{ij} (1 o 0) di presenza/assenza della bobina di ricarica, considerando così i solo termini temporali in cui si è in condizioni di ricarica.

$$\bar{t}_{tw_{ij}} = \begin{cases} 2 \cdot \left(\sum_{j=j_{ban}}^{j_{in}} \bar{t}_{a_{0j}} \cdot w_{ij} + \sum_{i=1}^{i_{fin}} \bar{t}_{a_{ij_{in}}} \cdot w_{ij} \right) + \bar{t}_{o_{ij}} \cdot w_{ij}, & j_{ban} < j_{in} \\ 2 \cdot \sum_{i=0}^{i_{fin}} \bar{t}_{a_{ij_{ban}}} \cdot w_{ij} + \bar{t}_{o_{ij}} \cdot w_{ij}, & j_{ban} = j_{in} \\ 2 \cdot \left(\sum_{j=j_{in}}^{j_{ban}} \bar{t}_{a_{0j}} \cdot w_{ij} + \sum_{i=1}^{i_{fin}} \bar{t}_{a_{ij_{in}}} \cdot w_{ij} \right) + \bar{t}_{o_{ij}} \cdot w_{ij}, & j_{ban} > j_{in} \end{cases}$$

*Equazione (21) –
Tempi totali di
operazione collegati
al WPT*

Con:

- $j_{ban} = \text{secondo indice della posizione del varco banchina}$
- $j_{in} = \text{secondo indice della cella interessata dall’operazione}$
- $i_{fin} = \text{primo indice della cella interessata dall’operazione}$

$$\bar{T}_{tw} = \begin{bmatrix} \bar{t}_{tw_{0,1}} & \cdots & \bar{t}_{tw_{0,m}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{t}_{tw_{l,1}} & \cdots & \bar{t}_{tw_{l,m}} \end{bmatrix}$$

*Equazione (22) – Matrice dei tempi totali di
operazione con collegamento al WPT*

Si osservi che nei casi in cui si supera la zona di presenza dell'impianto, il tempo di copertura si arresta alla somma del tempo di transito delle celle attraversate, quelle prossime alla banchina. Infatti, quel punto indica dove l'estensione dell'impianto termina per cui il tempo di ricarica non aumenterà più dove non vi sono bobine installate.

$\bar{T}_{tw} =$	29,16	24,45	18,23	12,02	5,80	12,02	18,23	24,45	30,67	35,38
	75,16	70,45	64,23	58,02	51,80	58,02	64,23	70,45	76,67	81,38
	81,16	76,45	70,23	64,02	57,80	64,02	70,23	76,45	82,67	87,38
	87,16	82,45	76,23	70,02	63,80	70,02	76,23	82,45	88,67	93,38
	47,16	42,45	36,23	76,02	69,80	76,02	36,23	42,45	48,67	53,38
	47,16	42,45	36,23	36,02	29,80	36,02	36,23	42,45	48,67	53,38
	47,16	42,45	36,23	36,02	29,80	36,02	36,23	42,45	48,67	53,38
	47,16	42,45	36,23	36,02	29,80	36,02	36,23	42,45	48,67	53,38
	47,16	42,45	36,23	36,02	29,80	36,02	36,23	42,45	48,67	53,38
	47,16	42,45	36,23	36,02	29,80	36,02	36,23	42,45	48,67	53,38

Matrice 10 – Tempi totali di operazione con collegamento al WPT [s]

Le matrici descritte e realizzate finora, sono in seguito rielaborate tenendo in considerazione i valori della logica di magazzino espressa dalla Matrice 4.

Si ottiene quindi la matrice del tempo globale di operazione medio pesato sulle probabilità $\bar{\bar{T}}_t$, dove:

$$\bar{\bar{t}}_{tij} = \bar{t}_{tij} \cdot p_{ij}$$

Equazione (23) – Tempo totale di operazione pesato sulle probabilità

$$\bar{\bar{T}}_t = \begin{bmatrix} \bar{\bar{t}}_{t_{0,1}} & \dots & \bar{\bar{t}}_{t_{0,m}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{\bar{t}}_{t_{l,1}} & \dots & \bar{\bar{t}}_{t_{l,m}} \end{bmatrix}$$

Equazione (24) – Matrice dei tempi totali di operazione pesati sulle probabilità

	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	97,71	91,59	83,51	75,42	67,34	75,42	83,51	91,59	99,67	105,80
	105,51	99,39	91,31	83,22	75,14	83,22	91,31	99,39	107,47	113,60
	87,16	82,45	76,23	70,02	63,80	70,02	76,23	82,45	88,67	93,38
	93,16	88,45	82,23	76,02	69,80	76,02	82,23	88,45	94,67	99,38
$\bar{T}_t =$	99,16	94,45	88,23	82,02	75,80	82,02	88,23	94,45	100,67	105,38
	105,16	100,45	94,23	88,02	81,80	88,02	94,23	100,45	106,67	111,38
	111,16	106,45	100,23	94,02	87,80	94,02	100,23	106,45	112,67	117,38
	117,16	112,45	106,23	100,02	93,80	100,02	106,23	112,45	118,67	123,38
	86,21	82,92	78,56	74,21	69,86	74,21	78,56	82,92	87,27	90,57
	90,41	87,12	82,76	78,41	74,06	78,41	82,76	87,12	91,47	94,77

Matrice 11 – Tempi totali di operazione pesati sulle probabilità [s]

E analogamente la matrice dei tempi complessivi di operazione pesati collegati al WPT,

$$\bar{T}_{tw}.$$

$$\bar{t}_{twij} = \bar{t}_{twij} \cdot p_{ij}$$

Equazione (25) – Tempi totali di operazione collegati al WPT pesati sulle probabilità

$$\bar{T}_{tw} = \begin{bmatrix} \bar{t}_{tw0,1} & \cdots & \bar{t}_{tw0,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{t}_{twl,1} & \cdots & \bar{t}_{twl,m} \end{bmatrix}$$

Equazione (26) – Matrice dei tempi totali di operazione con WPT pesati sulle probabilità

	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	97,71	91,59	83,51	75,42	67,34	75,42	83,51	91,59	99,67	105,80
	105,51	99,39	91,31	83,22	75,14	83,22	91,31	99,39	107,47	113,60
	87,16	82,45	76,23	70,02	63,80	70,02	76,23	82,45	88,67	93,38
	47,16	42,45	36,23	76,02	69,80	76,02	36,23	42,45	48,67	53,38
$\bar{T}_{tw} =$	47,16	42,45	36,23	36,02	29,80	36,02	36,23	42,45	48,67	53,38
	47,16	42,45	36,23	36,02	29,80	36,02	36,23	42,45	48,67	53,38
	47,16	42,45	36,23	36,02	29,80	36,02	36,23	42,45	48,67	53,38
	47,16	42,45	36,23	36,02	29,80	36,02	36,23	42,45	48,67	53,38
	33,01	29,72	25,36	25,21	20,86	25,21	25,36	29,72	34,07	37,37
	33,01	29,72	25,36	25,21	20,86	25,21	25,36	29,72	34,07	37,37

Matrice 12 – Tempi totali di operazione collegati al WPT pesati sulle probabilità [s]

3.2 Modello

3.2.1 Analisi tempistiche

In questo paragrafo si analizza l'elaborazione dei parametri assunti al fine dell'acquisizione di alcuni valori utili alla creazione del modello matematico che descrive il problema, il quale sarà in seguito usato per l'ottimizzazione dello stesso.

Si passa perciò ad un'ottica complessiva del sistema magazzino, trovando dei parametri che hanno un valore statistico medio all'interno dell'impianto nel suo complesso, senza riferimenti specifici alle diverse zone come è stato utile fare fin qui.

Per semplicità grafica ed alleggerire la lettura, dove non meglio specificato, si sottintende con il simbolo di sommatoria, le sommatorie sui due indici per tutti i valori dei relativi intervalli:

$$\sum = \sum_{i=0}^l \sum_{j=1}^m \dots$$

Inizialmente, è calcolato il tempo medio pesato per compiere un'operazione nel magazzino. Questo valore consegue facilmente dal calcolo della sommatoria dei tempi di operazione di ogni cella, dividendo infine per il numero delle celle totali:

$$\bar{T}_t = \frac{\sum \bar{t}_{tij}}{(l - 1) \cdot m} = 91,16 \text{ s}$$

Equazione (27) – Tempo medio pesato per operazione

In termini più pragmatici, questo valore da un'indicazione del tempo medio per compiere un'operazione nel magazzino, come se si facesse un'operazione in ogni cella e si dividesse per il numero di operazioni. Si ricorda che questo termine comprende inoltre la probabilità, che pesa ogni termine della sommatoria, di effettuare quella specifica operazione in quella cella, considerando quindi anche tutti gli aspetti di gestione del magazzino già presentati in precedenza.

Risulta un valore medio pesato di circa **90 s** per compiere un'operazione nell'area scaffali del magazzino in esame.

In analogia a quanto appena esplicitato, si quantifica il tempo medio pesato per un'operazione con collegamento al WPT:

$$\bar{\bar{T}}_{tw} = \frac{\sum \bar{\bar{t}}_{twij}}{(l-1) \cdot m} = 53,45 \text{ s}$$

Equazione (28) – Tempo medio pesato di operazione con collegamento al WPT

Con questi due parametri è possibile determinare la percentuale di tempo che, mediamente in un'operazione, si è in collegamento al sistema di ricarica dinamica WPT. Il calcolo è un semplice rapporto tra i valori appena stimati:

$$\bar{\bar{T}}_{tw\%} = \frac{\bar{\bar{T}}_{tw}}{\bar{\bar{T}}_t} = \frac{\sum \bar{\bar{t}}_{twij}}{\sum \bar{\bar{t}}_{tij}} \cdot 100 = 58,64 \%$$

Equazione (29) – Quota di tempo medio pesato di operazione con ricarica

Con questo parametro si determina quindi il tempo medio pesato per compiere un'operazione collegati al sistema di ricarica WPT. Questo valore è dato dal prodotto tra la quota di tempo media in collegamento e il tempo medio di operazione.

$$\bar{\bar{T}}_{tw} = \bar{\bar{T}}_{tw\%} \cdot \bar{\bar{T}}_t = 0,5864 \cdot 91,16 = 53,45 \text{ s}$$

Equazione (28) – Tempo medio pesato di operazione con collegamento al WPT

Si nota come il valore ritrovato confermi il termine determinato nell'Equazione (28).

Si prosegue attraverso l'analisi dei tempi medi di sosta dei veicoli durante le operazioni in banchina, termine con il quale è possibile calcolare il contributo di ricarica statica. Tale quota di tempo rappresenta la permanenza media su bobina di ricarica statica durante un'operazione all'interno della banchina di carico-scarico. Nell'esempio presentato è stimata una quota media di 30% del tempo di operazione in banchina con il veicolo fermo, per cui utilizzabile per la ricarica statica.

Il valore tipico ipotizzato della durata di operazione in banchina è pari a 80 s, verificato anche con misure da parte degli operatori dell'azienda *Enermove*.

Il tempo di ricarica statica risulta quindi come un semplice prodotto tra la quota di tempo mediamente con il veicolo fermo e il tempo totale medio di operazione in banchina:

$$\bar{T}_{bw} = \bar{T}_{bw\%} \cdot \bar{T}_b = 80 \cdot 0,3 = 24,00 \text{ s}$$

Equazione (30) – Tempo medio di ricarica durante operazione in banchina

A questo punto risulta utile quantificare un tempo medio pesato complessivo di tutte le parti di un'operazione logistica tipica, cioè composto da:

1. Operazione in banchina.
2. Trasporto merce allo scaffale (o raggiungimento scaffale).
3. Operazione allo scaffale.
4. Rientro in banchina (o trasporto merce in banchina).

Questo termine è la somma del tempo totale di operazione agli scaffali e tempo totale di operazione in banchina:

$$\bar{\bar{T}}_c = \bar{\bar{T}}_t + \bar{T}_b = 86,15 + 80 = 171,16 \text{ s}$$

Equazione (31) – Tempo complessivo medio ponderato di operazione

Analogamente è determinato il tempo complessivo medio ponderato in condizione di ricarica durante un'operazione media, nella tipologia di magazzino che fin qui si è modellizzato.

$$\bar{\bar{T}}_{cw} = \bar{\bar{T}}_{tw} + \bar{T}_{bw} = 48,91 + 24 = 77,45 \text{ s}$$

Equazione (32) – Tempo complessivo medio ponderato di ricarica in operazione media

È possibile ora impostare un'analisi energetica del sistema logistico nel suo complesso, dato che si è a conoscenza di tutti i parametri temporali caratteristici del sistema. In particolare, questi termini sono utili alla modellazione dei profili di consumo e ricarica di energia elettrica che coinvolgono gli apparati in analisi.

3.2.2 Analisi energetica

Per quantificare il consumo energetico medio, è stato ipotizzato l'utilizzo di un tipico carrello elevatore molto usato nel mercato, con **4,3 kW** di potenza di picco, ed una batteria da **48 V**.

Prima di tutto è quantificato il consumo istantaneo medio ponderato del veicolo durante la generica operazione.

È possibile ottenere questo risultato grazie alle osservazioni sperimentali condotte su veicoli simili durante diversi turni di lavoro ed in situazioni differenti in una ricerca condotta da *Enermove* [24].

Sono state riscontrate principalmente 3 situazioni identificabili:

1. Durante un'operazione: intervengono, anche simultaneamente, sia il motore per trazione che il motore per il sollevamento carichi. Questa risulta la situazione più gravosa, nella quale mediamente si ha un consumo pari al **62,79 %** del picco di potenza.
2. Durante il moto del veicolo: è in azione solamente il motore per la trazione del carrello, in questo frangente il consumo medio è circa pari al **55,81 %** del picco di potenza.
3. In sosta, non vi è alcun motore attivo, il consumo, composto principalmente dagli organi ausiliari del veicolo e dalle dissipazioni, è assunto trascurabile.

Da cui, il consumo istantaneo medio ponderato risulta il seguente: il prodotto tra la potenza di picco dichiarata del veicolo e i tempi in cui il veicolo si trova in ognuna delle fasi descritte (operazione, trazione, pausa), pesati sulla quota di consumo stimata.

$$\bar{P} = \frac{P_{max} \cdot (\bar{P}_{\%traz} \cdot (\bar{T}_t - \bar{T}_o) + \bar{P}_{\%misto} \cdot (\bar{T}_b + \bar{T}_o - \bar{T}_{bw}))}{\bar{T}_c} =$$

$$= \frac{4300 \cdot (0,5581 \cdot (91,16 - 40,00) + 0,6279 \cdot (80,00 + 40,00 - 24,00))}{171,16} = 2232 W$$

Equazione (33) – Consumo istantaneo medio ponderato del veicolo

Si osservi come il consumo energetico istantaneo medio durante un'operazione è inferiore alla media dei due consumi medi tipici di trazione o consumo misto (rispettivamente

$2,4 \text{ kW}^{11}$ e $2,7 \text{ kW}^{12}$) in quanto il calcolo considera la quota di tempo con veicolo fermo in banchina, dove non si verifica consumo di energia (0 kW), il quale però è parte del tempo complessivo di operazione.

Questo valore, quindi, è più propriamente una media ponderata tra i 3 consumi tipici descritti in precedenza, considerando anche il consumo nullo della sosta.

Proseguendo, è parametrizzata anche la gestione dei tempi di lavoro nel turno.

È posto, anche su indicazioni normative, che vi sia una pausa di un quarto d'ora ogni ora e mezza di lavoro. Con questi dati sono state calcolate un numero di circa 5 pause per turno, risultato arrotondato per eccesso per tener conto del tempo impiegato nei cambi turno, da cui risulta un tempo totale di un'ora e un quarto di fermo sfruttabile per la ricarica statica dei veicoli. Si ha quindi un tempo totale di pausa pari a 4500 s^{13} .

Il numero di pause in un turno di 8 ore di lavoro risulta pari al rapporto, arrotondato per eccesso, del tempo in un turno e la somma del tempo di una pausa e l'intervallo tra due pause consecutive:

$$\bar{n}_{\text{pause}} = \text{arr.ecc.} \left(\frac{T_{\text{turno}}}{\bar{T}_{\text{inter}} + \bar{T}_{\text{pausa}}} \right) = \text{arr.ecc.} \left(\frac{8}{1,5 + 0,25} \right) = 5 \quad \begin{aligned} & \text{Equazione (34) - Numero di} \\ & \text{pause in un turno} \end{aligned}$$

Agli operatori sarà necessario seguire la buona norma e accortezza di sfruttare i momenti di fermo macchina, per ricaricare le batterie, parcheggiando il veicolo sopra alle bobine di ricarica statica.

Il tempo totale di pausa in un turno è dato dal prodotto tra il numero di pause e il tempo di una singola pausa:

$$\bar{T}_{\text{pausaE}} = \bar{n}_{\text{pause}} \cdot \bar{T}_{\text{pausa}} = 5 \cdot 0,25 = 1,25 \text{ h}$$

Equazione (35) – Tempo totale di pausa in un turno

$$\Rightarrow 1,25 \cdot 3600 = 4500 \text{ s} = \bar{T}_{\text{pausaE}}$$

¹¹ $2,4 \text{ kW} = 4,3 \text{ kW} \cdot 0,6279$

¹² $2,7 \text{ kW} = 4,3 \text{ kW} \cdot 0,5581$

¹³ $4500 \text{ s} = 1,25 \cdot 3600 \text{ s} \text{ con } 3600 = \text{secondi in un'ora}$

Sono state inserite alcune variabili di carattere elettrotecnico dei sistemi in esame, tra cui il valore della potenza nominale d'impianto che è imposto con approccio progettuale a 4 kW per ogni veicolo da ricaricare contemporaneamente¹⁴.

Ipotizzando, sempre a titolo di esempio, una capacità della batteria veicolo pari a 625 Ah , è possibile calcolare l'energia totale immagazzinabile nel pacco batterie del veicolo, come il prodotto tra il voltaggio e l'amperaggio in Ampere-ora riportato in Ampere-secondo:

$$E = V \cdot Ah \cdot 3600 = 48 \cdot 625 \cdot 3600 = 108 \cdot 10^6 J \quad \text{Equazione (36) - Energia totale immagazzinabile in batteria}$$

I rendimenti e gli altri valori sono tipici, risultano da ipotesi ed esperienza dei tecnici progettisti del sistema.

In particolare, il rendimento medio del sistema durante la ricarica dinamica risulta circa 0,85 mentre quello durante la ricarica statica si aggira attorno al 0,90.

È calcolabile, dunque, il SoC delle batterie, che, come descritto in precedenza, indica il livello percentuale di carica della batteria sul totale immagazzinabile.

Il calcolo quantifica la variazione del SoC in una operazione media di lavoro, parametrizzata nel modo in cui è indicato in precedenza.

Inizialmente non si considera il contributo di ricarica statica immesso durante le pause.

Conoscendo il consumo per singola operazione è comodo, pertanto, calcolare il numero di operazioni che si svolgono mediamente in un turno di lavoro. Questo parametro è dato dal rapporto arrotondato del tempo di un turno sottratto del tempo di pausa totale, diviso il tempo complessivo medio impiegato in un'operazione:

$$\bar{n}_{op} = arr. ecc. \left(\frac{T_{turno} - \bar{T}_{pause}}{\bar{T}_c} \right) = arr. ecc. \left(\frac{28800 - 4500}{171,16} \right) = 142 \quad \text{Equazione (37) - Numero di operazione in un turno di lavoro}$$

¹⁴ Nella pratica progettuale, la scelta della potenza di impianto in base al numero di veicoli da caricare simultaneamente può non essere direttamente proporzionale in modo restrittivo, in quanto si possono verificare condizioni in cui può essere accettabile operare con potenze di ricarica inferiori alla nominale, utilizzare veicoli con potenze inferiori, o ancora veicoli con pacchi batterie a più basso voltaggio, etc.

Tornando all'analisi energetica, un valore che è ricavata in questa fase è l'energia accumulata durante un'operazione, che risulta pari al prodotto pesato della potenza nominale dell'impianto di ricarica per i tempi di ricarica dinamica e statica medi durante un'operazione, pesati sui rispettivi rendimenti:

$$\begin{aligned}\bar{E}_{opacc_{din}} &= P_{nom} \cdot (\eta_{din} \cdot \bar{T}_{tw} + \eta_{stat} \cdot \bar{T}_{bw}) = \\ &= 4000 \cdot (0,85 \cdot 53,45 + 0,90 \cdot 24,00) = 268145 J\end{aligned}$$

Equazione (38) – Energia accumulata in un'operazione

Analogamente è determinata l'energia consumata in un'operazione, pari al prodotto tra la potenza media erogata dal veicolo e il tempo complessivo di un'operazione:

$$\bar{E}_{opcons} = \bar{P} \cdot \bar{T}_c = 2232 \cdot 171,16 = 381990 J$$

Equazione (39) – Energia consumata in un'operazione

Si ottiene infine la variazione di energia in batteria durante un'operazione come differenza tra la quota di energia immessa e quella consumata:

$$\Delta \bar{E}_{op} = \bar{E}_{opacc_{din}} - \bar{E}_{opcons} = 260148 - 381990 = -113845 J$$

Equazione (40) – Variazione energia in batteria in un'operazione

Ogni voce che è stata appena calcolata è poi moltiplicata per il numero di operazioni al fine di trovare i livelli energetici a fine turno.

È quindi ora determinabile la variazione di energia percentuale in batteria nel turno rispetto alla capacità della batteria (senza contributo di carica dato dalla ricarica statica durante le pause). Questo valore è calcolato come il rapporto tra la variazione di energia in batteria in un'operazione moltiplicata per il numero di operazioni e la capacità del pacco batterie in termini di energia complessiva stoccatrice:

$$\Delta \overline{\overline{SoC}}_{turno_{din}} = \frac{\Delta \bar{E}_{op} \cdot \bar{n}_{op}}{E} = \frac{-113845 \cdot 142}{108 \cdot 10^6} = -14,97 \%$$

Equazione (41) – Variazione SoC in un turno, solo contributo ricarica dinamica

Il contributo di energia accumulata dal sistema di ricarica statico nelle pause del turno è espresso in questa formulazione, dove compare il prodotto tra il rendimento della ricarica statica, la potenza nominale d'impianto e il tempo complessivo di pausa in un turno:

$$\bar{E}_{turno_{accstat}} = P_{nom} \cdot \bar{T}_{pausE} \cdot \eta_{stat} = 4000 \cdot 4500 \cdot 0,9 = 162 \cdot 10^5 J$$

*Equazione (42) – Energia
accumulata dal sistema
statico nel turno*

A questo punto si può determinare la variazione complessiva di energia in batteria nel turno data dalla somma algebrica dei valori appena computati, cioè energia da ricarica dinamica, energia da ricarica statica e energia consuma:

$$\Delta \bar{E}_{turno} = \bar{E}_{turno_{accdin}} + \bar{E}_{turno_{accstat}} - \bar{E}_{turno_{cons}} = \\ = (381 + 162 - 542) \cdot 10^5 = 34 \cdot 10^3 J$$

*Equazione (43) – Variazione energia in batteria
nel turno*

Quindi la variazione percentuale (SoC) risulta pari al rapporto tra la variazione di energia nel turno e la capacità della batteria:

$$\Delta \overline{SoC}_{turno} = \frac{\Delta \bar{E}_{turno}}{E} = \frac{34 \cdot 10^3}{108 \cdot 10^6} = +0,03 \%$$

Equazione (44) – Variazione SoC nel turno

Si può infine calcolare lo stato finale della batteria, partendo dal valore di inizio turno e sommandogli il valore di variazione calcolato:

$$\overline{SoC}_{finale} = SoC_{iniz} + \Delta \overline{SoC}_{turno}$$

Equazione (45) – SoC batteria a fine turno

3.2.3 Analisi economica

Risulta ora necessario, al fine di rendere possibile la quantificazione di una soluzione ottima per i diversi casi di studio che si possano presentare, effettuare un'analisi economica del sistema logistico, ottenendo un parametro di costo.

Tale parametro è utile come vincolo nel modello finale da ottimizzare, fornisce infatti un limite superiore all'estensione dell'impianto, in quanto il costo risulta linearmente proporzionale alla dimensione dello stesso e sarà limitato in funzione al budget del cliente.

Il sistema di ricarica WPT è composto da due sottosistemi principali, riassumibili in:

- Receiver: il sistema di elettronica di potenza a bordo veicolo che gestisce e partiziona l'elettricità acquisita dal concatenamento con l'impianto, indirizzandola al motore se il veicolo è in funzione e la restante parte, o tutta (durante le ricariche statiche), al sistema batterie.
- Transmitter: il sistema di bobine, convertitori, cablaggi, etc. che compongono il sistema WPT nello stabilimento.

Per stimare un costo complessivo d'impianto sono distinti i termini di carattere costante da quelli che variano con le caratteristiche e le dimensioni dell'impianto:

I costi variabili crescono con l'estensione dell'impianto (numero di coppie di bobine $n_{mod.WPT}$, termine che comprende anche costi connessi di cablaggio, posa in opera, etc.) e con il numero di veicoli (n_{veic} e relativa elettronica di potenza).

Inoltre, vi sono costi fissi di studio di fattibilità, progettazione, etc., stimati, in prima approssimazione e solamente per questa analisi, attorno a **50000 €**.

Si è valutato il costo complessivo dell'intero sistema con la seguente formulazione lineare, dove ai costi fissi sono sommati i costi delle bobine per il numero delle stesse e i costi del sistema a bordo macchina per il numero di veicoli che si vuole equipaggiare:

$$C_{tot} = C_{fix} + c_{rec} \cdot n_{veic} + c_{WPT} \cdot n_{mod.WPT} = \\ = 50000 + 1500 \cdot 1 + 2500 \cdot 87 = 269000 \text{ €}$$

Equazione (46) – Costo totale d'impianto

Si osservi che $n_{mod.WPT}$, il numero di moduli di coppie di bobine WPT, risulta dato dalla somma di tutte le celle in cui si è valutato sia necessaria l'installazione.

In ogni cella munita del sistema, è necessario dividere la dimensione di percorrenza principale¹⁵, o la maggiore, per la dimensione del modulo WPT ($\sim 2,5 \text{ m}$) per quantificare il numero totale di bobine dinamiche da installare nell’impianto.

A questo valore occorre aggiungere il numero di bobine di ricarica statica da inserire nello stabilimento.

Il numero totale di bobine è pertanto quantificato come la sommatoria delle dimensioni massime di tutte le celle dotate di WPT, suddivisa per la dimensione di un modulo WPT, a questo termine è infine sommato il numero totale di bobine di ricarica statica.

$$n_{mod.WPT} = \frac{\left(\sum_{i=0}^l \sum_{j=1}^m w_{ij} \cdot \max(l_{a_{ij}}, l_{u_{ij}}) \right)}{l_{modWPT}} + n_{modWPT_{stat}} \quad \text{Equazione (47) - Numero totale di bobine installate}$$

con $w_{ij} = \{0, 1\} \in \mathbb{Z}$

¹⁵ Cioè quella che si concatena meglio con il moto più probabile dei veicoli che vi transitano.

3.2.4 Modello matematico

Il modello da ottimizzare risulta, in fine, una funzione di minimizzazione del costo totale di impianto [C_{tot}], che, come si è mostrato in precedenza, è proporzionale al numero di moduli WPT da installare.

Vi sono due principali vincoli imposti al modello:

1. Si impone che la variazione di carica nelle batterie a fine turno maggiore del livello minimo richiesto dal cliente per soddisfare le proprie esigenze lavorative e sfruttare la potenzialità ed i vantaggi gestionali della tecnologia WPT. [$\Delta\overline{SoC}_{turno}$]
2. Si impone la continuità dell'impianto, ovverosia si vuole costante presenza dei moduli WPT per tutta l'estensione dell'impianto, dall'inizio alla fine senza celle sprovviste, in ogni direzione. [n_{salti}]

Nel caso in esame si impone un massimo di 10 “discontinuità verticali” cioè passaggi da presenza ad assenza (o viceversa) dell'impianto, corrispondente al numero di corsie presenti tra gli scaffali del magazzino, e due “discontinuità orizzontali”, quelle possibili nel corridoio di collegamento scaffali–banchina.

Il modello matematico è formalizzato infine come presentato nella pagina seguente.

Modello matematico:

$$Mimimizza: C_{tot}(n_{mod.WPT})$$

Vincolato a,

$$\Delta \overline{\overline{SoC}}_{turno} > \Delta SoC_{turno_cliente},$$

$$n_{disc} < n_{disc.MAX}$$

$$n_{disc_oriz} < n_{disc.MAX_oriz}$$

Dove,

$$n_{mod.WPT} = \frac{\left(\sum_{i=0}^l \sum_{j=1}^m w_{ij} \cdot \max(l_{a_{ij}}, l_{u_{ij}}) \right)}{l_{modWPT}} + n_{modWPT_{stat}}$$

Con,

$$w_{ij} = \{0, 1\} \in \mathbb{Z}$$

$$\Delta \overline{\overline{SoC}}_{turno} = \frac{\Delta \bar{E}_{turno}}{E} \propto n_{mod.WPT}$$

$$C_{tot} = C_{fix} + c_{rec} \cdot n_{veic} + c_{WPT} \cdot n_{mod.WPT} \propto n_{mod.WPT}$$

$$n_{disc} = \sum_{i=0}^{l-1} \sum_{j=1}^m |w_{i,j} - w_{i+1,j}|$$

Equazione (48) – Discontinuità¹⁶ dell'impianto

\propto alla distribuzione topologica dei $n_{mod.WPT}$

$$n_{disc.MAX} = m = 10 (\text{sommatoria delle corsie})$$

¹⁶ *Discontinuità: sono i passaggi da presenza ad assenza –e viceversa– di bobine di ricarica nell'area utile.*

$$n_{disc.oriz} = \sum_{j=1}^{m-1} |w_j - w_{j+1}|$$

Equazione (49) – Discontinuità dell'impianto

\propto alla distribuzione topologica dei $n_{mod.WPT}$

$$n_{disc.MAX_{oriz}} = 2$$

Definendo:

- $\Delta SoC_{turno_{cliente}}$ = percentuale di ricarica (scarica) minima (massima) richiesta per soddisfare le esigenze energetico-gestionali necessarie al cliente

Ulteriori parametri da valutare nell'analisi:

- $Budget_{cliente}$ = costo massimo di convenienza economica¹⁷ che il cliente è disposto a spendere. Questo termine non compare nel modello, ma può essere utile nelle analisi e considerazioni successive al processo di ottimizzazione, infatti confrontare il costo complessivo risultante dall'ottimizzazione a questo valore da un'indicazione concreta circa la fattibilità economica dell'impianto.

¹⁷ *Convenienza economica:* può essere commisurata alla convenienza rispetto ad un sistema di gestione delle batterie classico.

3.3 Ottimizzazione

3.3.1 Algoritmo genetico (Matlab)

Al fine di ottimizzare il modello costruito, è stato scelto l'utilizzo di un algoritmo genetico.

L'algoritmo è stato implementato in ambiente Matlab, utilizzando la libreria “Global Optimization Toolbox”, dove è possibile impostare diversi parametri, tra i quali sono stati stabiliti i seguenti valori (riportati con la nomenclatura del programma):

- PopulationSize = 200¹⁸
- CrossoverFraction = 0.98¹⁹
- EliteCount = ceil(0.2*PopulationSize)²⁰
- MaxStallGenerations²¹ = 25 (criterio di uscita dall'iterazione)

Questi valori sono stati ottenuti con diverse prove, seguendo le indicazioni della letteratura per un problema di ottimizzazione discreto, a variabili binarie e vincolato²² come quello in esame [44].

È inoltre possibile impostare molti altri parametri dell'algoritmo che però non sono risultati significativamente utili in questa ottimizzazione²³.

In particolare, l'algoritmo genetico implementato in Matlab (MainWPT.m) necessita di un codice che descriva la funzione da minimizzare (CostFun.m) e una funzione che descriva i vincoli del modello (MyConstr.m).

¹⁸ PopulationSize = 200: la grandezza della popolazione, dopo numerose prove, è stata impostata pari al valore di default, 200, in quanto compromesso migliore tra i tempi di elaborazione e la qualità dei risultati ottenuti.

¹⁹ CrossoverFraction = 0.98: la quota della popolazione su cui è effettuato il crossover.

²⁰ EliteCount = ceil(0.2*PopulationSize): Quota di individui della popolazione a cui è garantito di sopravvivere tra una generazione e la successiva. La funzione “ceil” arrotonda il valore all'intero superiore.

²¹ StallGenerations: “generazioni di stallo”, quelle in cui il progresso del fitness del miglior individuo è minore della tolleranza imposta.

²² In particolare il vincolo legato alla variazione energetica è non lineare.

²³ Per approfondire questi aspetti si rimanda al manuale di riferimento [44].

Si descrivono quindi le peculiarità principali dei codici redatti²⁴:

- MainWPT.m: è il codice principale:
 - Inizialmente il codice legge e salva tutte le matrici e i valori che sono stati costruiti in Excel, importando quindi tutti i parametri necessari per ricostruire il modello in questo linguaggio.
 - Nella seconda sezione è impostato l'algoritmo secondo la sintassi necessaria in questo ambiente. Di fatto sono inizializzate tutte le variabili che non erano presenti tra quelle importate e richiamate le due funzioni, da ottimizzare e di vincolo, che sono implementati in due file differenti. Per utilità dell'operatore è rappresentato graficamente lo stato di raggiungimento dei criteri di uscita dall'iterazione dell'algoritmo. È mostrato un esempio del grafico dei criteri di stop, nel quale si può notare che il criterio che ha raggiunto il vincolo è stato quello impostato, cioè “StallGenerations”.

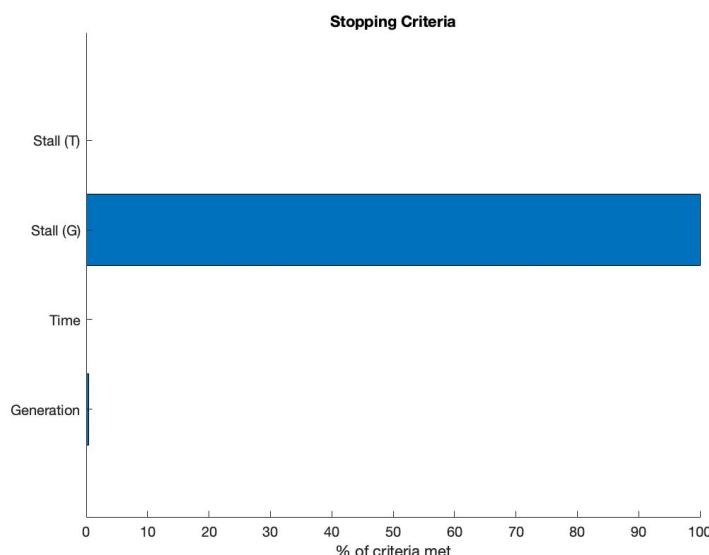


Figura 20 – Criteri di uscita dall'algoritmo

- Infine è elaborato il risultato finale fornito dal processo di ottimizzazione per rappresentarlo graficamente e riportarlo nella corretta matrice del file Excel desiderato, nonché quello di partenza.

²⁴ CostFun.m, MyConstr.m, MainWPT.m: in appendice sono presentati questi listati completi.

- CostFun.m: è la funzione di costo dell’impianto ovverosia quella da minimizzare:
 - Nella prima sezione del codice, questo file richiama i valori necessari alla costruzione della funzione di costo.
 - I valori e le matrici sono elaborati secondo il flusso le funzioni e correlazioni descritte dal modello di matematico, con le opportune accortezze di calcolo numerico.
 - È infine riportato il codice per la rappresentazione del grafico “Numero di bobine – Costo totale d’impianto”, ne è mostrato un esempio.

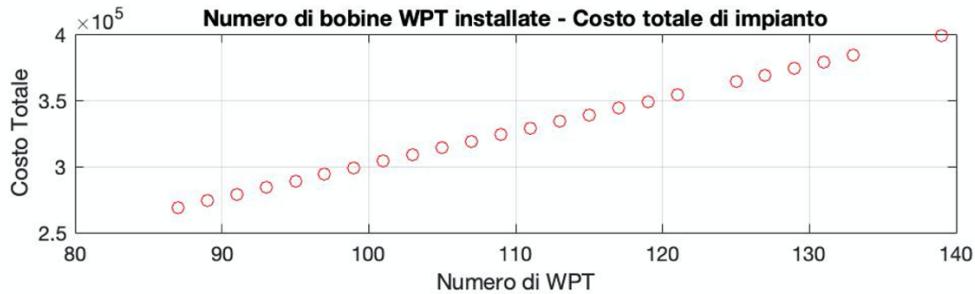


Figura 21 – Grafico: Numero di WPT – Costo Totale d’impianto

- MyConstr.m: è il codice che implementa la funzione dei vincoli del modello:
 - Anche qui, analogamente a quanto fatto nella funzione di minimizzazione, inizialmente sono caricati tutti i valori e le matrici necessario alla costruzione matematica delle funzioni di vincolo.
 - Sono elaborati questi parametri con le operazioni che li legano, già esplicitate nel modello matematico.
 - Sono rappresentati i grafici “Numero di bobine – Variazione SoC” e una “heatmap” che rappresenta iterativamente, ad ogni ciclo dell’algoritmo, le posizioni nella planimetria del magazzino dove debbano essere installate le bobine di ricarica dinamica.

Come appena descritto, la schermata di lavoro presenta tre grafici, utili per comprendere l’andamento delle funzioni e come l’A.G. ricerchi il risultato, tra cui “Numero di WPT – Variazione SoC”, che esprime la funzione che lega il numero di bobine, come anche la loro posizione, al valore di variazione di carica ottenibile a fine turno. Si osserva come questo legame sia di tipo non lineare.

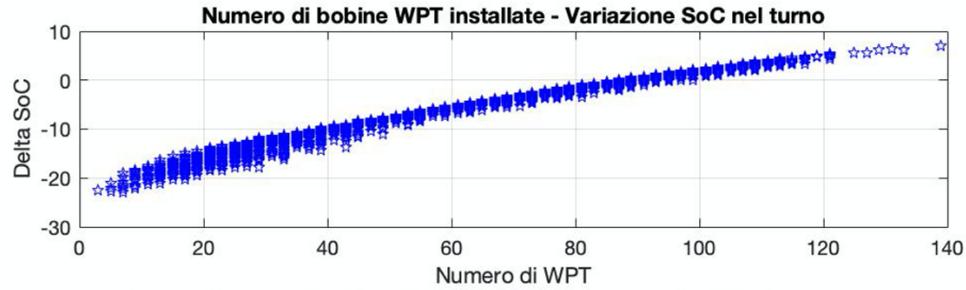


Figura 22 – Grafico: Numero di WPT – Variazione SoC

Vi è inoltre il grafico della *heatmap*²⁵. Si osservi anche in questa occasione la capacità di indicazione grafica che ha questo strumento ed anche come tale potenzialità sia una delle principali specificità di questo lavoro.



Figura 23 – Heatmap, rappresentazione matrice-pianta delle posizioni dei WPT

Come ulteriori note al programma, si specifica che per la riproducibilità dei risultati è stato inserito “*rng*²⁶(1,’*simdTwister*)” funzione che ad ogni avvio del programma produce la stessa sequenza di numeri random utilizzati successivamente ed internamente dal codice per produrre l’algoritmo implementato.

²⁵ Heatmap: “mappa di calore” rappresentazione grafica tramite colori dei valori di una matrice.

²⁶ Rng: “random number generator”, algoritmo di generazione di una sequenza di numeri casuali, in questo caso è utilizzato l’algoritmo “*simdTwister*”.

In generale, senza specificare, all'interno dell'algoritmo, un certo generatore ed un *seed*²⁷ per numeri random, con 25 generazioni di stallo per fermare l'iterazione, non sempre l'algoritmo ha un numero di ripetizioni necessarie e sufficienti ad ottenere un risultato che soddisfi tutti i vincoli e minimizzi la funzione prima che raggiunga il criterio di stop.

Si può ovviare a questo problema variando il criterio di stop, ad esempio imponendo lo stop dopo un certo tempo sulla base di un'analisi statistica dei tempi medi per il raggiungimento di un risultato soddisfacente del processo di ottimizzazione. Nel caso in esame questa operazione non è necessaria in quanto il processo è vincolato con il generatore descritto in precedenza.

Mediamente l'uscita dall'algoritmo, quindi le 25 generazioni di stallo, si raggiunge a circa $16000\text{ s} \approx 4,5\text{ h}$. Il tempo per l'elaborazione di una soluzione di ottimo dipende dal generatore utilizzato che per quest'analisi dei tempi di calcolo è impostato casuale. Usualmente si riscontra in tempi molto minori nell'ordine di $4800\text{ s} \approx 1,35\text{ h}$ medi circa²⁸. Questi valori sono stati ottenuti come media aritmetica dei tempi riscontrati in diverse ottimizzazioni.

È infatti compito di chi sta svolgendo l'ottimizzazione valutare il metodo di arresto dell'algoritmo e quindi dell'evoluzione dei risultati forniti²⁹.

Impostando, ad esempio, una richiesta di $\Delta\overline{SoC}_{turno} > 0$, come nel caso di studio presentato finora, il risolutore trova una soluzione che soddisfa tutti i vincoli (continuità di impianto e variazione di carica minima richiesta) e trova il minimo assoluto, corrispondente a 43 celle su 110 dotate di WPT.

Si è inoltre voluto presentare questo esempio per evidenziare, come visibile nella Figura 23 che, in questo specifico caso, l'algoritmo è confluito alla scelta di una posizione dei WPT leggermente svantaggiosa rispetto ad un'ottima teorica, in quanto se una delle 4 celle più

²⁷ Seed: "seme", segna il punto di partenza, nell'algoritmo di generazione di numeri random, per ottenere la stessa sequenza ad ogni avvio. Dove per "punto di partenza" è inteso il valore, della stringa di numeri generati da un certo algoritmo, dal quale deve partire.

²⁸ L'ottimizzazione è stata eseguita sulla seguente macchina:

- *MacBook Pro Retina Mid 2014*
- *Processore: 2,6 GHz Intel Core i5 dual-core*
- *Memoria: 8 GB 1600 MHz DDR3*
- *Scheda grafica: Intel Iris 1536 MB*
- *Sistema operativo: macOS Catalina, versione 10.15.7 (19H15)*
- *Programma: MATLAB® R2020b*

²⁹ Banalmente, qualora il progettista noti una soluzione soddisfacente, quando ancora i criteri di uscita dall'algoritmo non siano soddisfatti, egli può bloccare manualmente l'iterazione senza che si attenda l'intervento dei criteri di stop.

distanti dalla banchina che l'elaboratore ha impostato, l'avesse lasciata vuota e al suo posto avesse stabilito la cella 4-9, si sarebbe ottenuta allora la soluzione ottima teorica, sempre rispettante tutti i vincoli imposti, ma un DeltaSoc leggermente maggiore (con una differenza di 3 centesimi %).

Questo risultato è anche causato dall'alta variabilità che caratterizza l'algoritmo genetico. È opportuno notare, quindi, che vi debba sempre essere un'azione di controllo e aggiustamento dei risultati forniti, da parte del progettista che utilizza il metodo di ottimizzazione, proprio perché l'algoritmo genetico può fornire una soluzione sub-ottimale.

Facendo riferimento alla modellistica del problema è rilevante notare anche la sensibilità rispetto alla distribuzione topologica, a parità di elementi, in questa analisi.

3.3.2 Risultati

Si mostrano ora i risultati conclusivi dell'esempio di ottimizzazione progettuale presentato, dove la richiesta del cliente in termini di ricarica minima è la seguente.

$$\Delta SoC_{turnoRICHIEDO-CLIENTE} > 0\%$$

L'ottimizzazione ha portato ad un'estensione dell'impianto per il 39,09% della superficie, per 87 moduli WPT totali, 86 dinamici ed uno statico.

La distribuzione topologica delle bobine è quella visibile nella *Heatmap* di Figura 23, che è rielaborata come segue rispetto alle considerazioni delineate a fine capitolo "Risultati", per essere in seguito utilizzata come indicazione planimetrica progettuale dell'impianto.

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Matrice 13 – Posizioni ottimizzate delle coppie di bobine WPT nel caso di studio

All'avvio, l'algoritmo riporta in Command Window i parametri impostati e i valori di default:

```
options =
ga options:
Set properties:
    CrossoverFraction: 0.9800
    EliteCount: 40
    MaxStallGenerations: 25
    PlotFcn: {@gaplotstopping []}
    PopulationSize: 200
```

```
Default properties:
    ConstraintTolerance: 1.0000e-03
        CreationFcn: @gacreationuniform
        CrossoverFcn: @crossoverscattered
        Display: 'final'
        FitnessLimit: -Inf
        FitnessScalingFcn: @fitscalingrank
        FunctionTolerance: 1.0000e-06
        HybridFcn: []
    InitialPopulationMatrix: []
    InitialPopulationRange: []
    InitialScoresMatrix: []
    MaxGenerations: '100*numberOfVariables'
    MaxStallTime: Inf
    MaxTime: Inf
    MutationFcn: {@mutationgaussian [1] [1]}
NonlinearConstraintAlgorithm: 'auglag'
    OutputFcn: []
    PopulationType: 'doubleVector'
    SelectionFcn: @selectionstochunif
    UseParallel: 0
    UseVectorized: 0
```

Ed una volta terminato il processo restituisce i risultati dell'ottimizzazione come segue:

```
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than
options.FunctionTolerance and constraint violation is less than options.ConstraintTolerance.

fval =
269000

exitflag =
1

output =
    problemtype: 'integerconstraints'
        rngstate: [1x1 struct]
    generations: 50
    funccount: 10201
    message:
'Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than
options.FunctionTolerance and constraint violation is less than options.ConstraintTolerance.'

    maxconstraint: 0
    hybridflag: []
```

```
nwppt =
87

Time =
1.6789e+04
```

Unitamente a questi valori è riportato il risultato che minimizza la funzione, in questo caso una matrice di 1-0 descrivente le posizioni delle coppie di bobine installate, corrispondente all'heatmap di Figura 23.

Con questo tipo di impianto si ottiene una media di + 0,00% ΔSoC_{turno} ed un costo complessivo d'impianto pari a 269000€, il minimo, nel rispetto di tutte le richieste del mandante.

È possibile leggere un riassunto delle variabili impostate, nella tabella in seguito, in base all'analisi del caso del cliente ed i risultati appena riportati.

TABELLA RIASSUNTIVA Most likely case analysis Optimized	
Turno	1 x 8 h
Velocità media	6 Km/h
Hp time oper. Scaffale	40 s
Hp time oper. Banchina	80 s
Celle discretizzazione	~ 5 m
Potenza impianto WPT	4000 W
SOC inizio turno	95 %
Gestione logica magazzino	2, mid -
Disposizione altezze scaffali	2, mid -
% tempo su WPT in baia	30%
Consumo medio Traz	2400 W
Consumo medio Misto	2700 W
Consumo medio ponderato	2232 W
Intervallo pause	1,5 h
Tempo medio pausa	0,25 h
Attesa tra due turni	0,00 h
Rendimento dinamico	85%
Rendimento statico	90%
ΔSOC turno DIN	-14,97 %
ΔSOC turno TOT	0,00 %
SOC fine turno	95,00 %
Area WPT rispetto area tot.	39,09%
Prezzo Finale	269.000 €

Tabella 1– Compendio parametri e risultati ottimizzazione

Si osservi come la casistica presentata, denominata “Most likely case”, sia stata elaborata con le caratteristiche usuali più probabili in questa tipologia di magazzini, conferendo un’idea di quella che potrebbe essere una soluzione impiantistica reale all’interno di un magazzino³⁰.

³⁰ Si può notare, tra le altre, che la velocità media del veicolo è stata impostata a circa 6 km/h.

Si noti inoltre che il termine “mid” indica una situazione verosimile ed ipotizzata come media di quella caratteristica. È stato necessario introdurre questa denominazione per chiarezza espositiva, poiché durante l’elaborazione di questo lavoro sono state svolte molte prove ed ipotizzati casi estremi per valutare il comportamento del modello.

Nel capitolo “Verifica del modello” è presentato qualche aspetto di questa considerazione, dove compare il termine “worst” e “best” ad indicare rispettivamente caratteristiche molto sfavorevoli e molto favorevoli.

Tutti gli altri termini sono già stati ampiamente descritti.

3.3.3 Verifica del modello

In questo sezione si vuole analizzare la dipendenza e l'accuratezza delle soluzioni fornite dal modello realizzato rispetto ai differenti parametri da cui dipende. A questo scopo è stato costruito un esempio numerico di diversi scenari possibili, nei quali alcune variabili di ipotesi sono mantenute costanti ed altre fatte variare, mostrando quindi la correlazione e la sensibilità dei risultati rispetto a queste caratteristiche.

Tra le variabili fisse vi è la velocità media dei veicoli e, più rilevante per lo studio, l'estensione dell'impianto (in seguito si è ripetuta l'analisi per estensioni maggiori e minori). Infatti, è utile condurre queste valutazioni per comprendere, una volta progettato ed implementato l'impianto, quanto gli effettivi valori di ricarica che si realizzano siano oscillanti e in quale intervallo di valori.

Nel complesso sono mantenuti costanti i seguenti parametri:

- Tempo di turno considerato: 8 h
- Velocità media dei veicoli: 6 Km/h
- Tempo medio per effettuare un'operazione agli scaffali: 40 s
- Tempo medio per effettuare un'operazione in banchina: 80 s
- Dimensione delle celle di discretizzazione: 5 m
- Estensione dell'impianto: 39,09% dell'area utile dotata di WPT
- Costo totale dell'impianto: 269000,00 €
- Potenza impianto WPT: 4 kW
- Stato della carica batterie a inizio turno: 95%

Tra le variabili mutate vi sono:

- Gestione logica magazzino: è definita dai valori della “Matrice 4 – Probabilità di stoccaggio [–]”, in particolare nei 3 casi costruiti può assumere le definizioni di:
 - Worst: dove si indicano valori alti nei punti più lontani dalla banchina, come se il magazzino fosse gestito con una logica grossolanamente erronea.
 - Mid: Si ha pressoché una logica di magazzino costante all'interno dello stesso con una piccola probabilità di effettuare operazioni vicino alla banchina più alta e più bassa nelle ubiche più lontane.
 - Best: è la situazione dove il magazzino è eccellentemente gestito, le ubiche più vicine alla banchina sono quelle con una probabilità più alta di essere interessate

da un'operazione mentre quelle più lontane hanno una probabilità molto più bassa.

- Disposizione altezze scaffali: questo fattore è definito dalla “Matrice 6 – Altezze scaffali adiacenti all’ubica [-]”, ed analogamente a quanto descritto nel parametro precedente, presenta tre diverse situazioni più o meno favorevoli in base a dove siano posti gli scaffali più alti (nel caso migliore, i più alti sono vicino alla banchina).
- Percentuale di tempo in banchina sfruttabile per la ricarica statica.
- Consumo medio del veicolo in condizioni di sola trazione.
- Consumo medio del veicolo in condizione di lavoro misto.
- Consumo medio ponderato.
- Intervallo di tempo medio tra due pause successive.
- Tempo medio di una pausa.
- Efficienza di ricarica in condizioni dinamiche.
- Efficienza di ricarica in condizioni statiche.

Sono sviluppati quindi i casi “migliore e peggiore”, nonostante siano estremizzazioni poco fedeli alla realtà, mentre per il caso più concreto, quello ottimizzato in precedenza, si è approssimata una stima il più possibile consistente e in queste analisi è indicato come valore compreso tra gli estrami.

I casi estremi sono realizzati tenendo in considerazione tutte le situazioni più favorevoli nel caso migliore, o sfavorevoli nel caso peggiore, per trovare i limiti entro cui spaziano le possibili variazioni di carica realizzabili nelle diverse situazioni che possono verificarsi.

Nella tabella in seguito, sono riportati tutti i valori ipotizzati nei 3 casi “best, mid, worst” costruiti per l’indagine statistica.

Si può osservare che, per questo specifico magazzino, con un impianto esteso al 39,09% della superficie utile, si ha un intervallo di confidenza realizzabile:

$$\Delta SoC_{turno} \in [-56\%, +17\%]^{31}$$

³¹ Valori arrotondati all’unità percentuale, essendo un’analisi di largo respiro non si ha una sensibilità tale da apprezzare le fluttuazioni decimali più piccole.

Corrispondente ad un intervallo di confidenza pari al 73 %, nel quale si può confidenzialmente sostenere vi ricadano la quasi totalità dei casi possibili per quel sistema.

Si noti che le percentuali di ricarica totali a fine turno in realtà sono limitate a caricare le batterie fino al 100%, ovviamente non sono possibili SoC maggiori come indicato in alcuni valori ottenuti.

Nei casi in cui si incorresse in queste situazioni si avrebbe un sovrardimensionamento dell’impianto, che sarebbe un errore progettuale, a meno di casi particolari in cui si possa averne utilità³².

Case analysis	Worst	Most likely	Best	UDM
Turno	8	8	8	h
Velocità media	6	6	6	Km/h
Hp time oper. Scaffale	40	40	40	s
Hp time oper. Banchina	80	80	80	s
Celle discretizzazione	~ 5	~ 5	~ 5	m
Area WPT rispetto area tot.	39,09	39,09	39,09	%
Prezzo Finale	269.000	269.000	269.000	€
Potenza impianto WPT	4000	4000	4000	W
SOC inizio turno	95	95	95	%
Gestione logica magazzino	3, worst	2, mid	1, best	-
Disposizione altezze scaffali	3, worst	2, mid	1, best	-
% tempo su WPT in baia	10	25	40	%
Consumo medio Traz	3000	2500	2100	W
Consumo medio Misto	3500	2800	2400	W
Consumo medio ponderato	3193	2385	1893	W
Intervallo pause	2,5	1,5	1,25	h
Tempo medio pausa	0,17	0,25	0,25	h
Rendimento dinamico	65	80	85	%
Rendimento statico	70	90	90	%
ΔSOC turno DIN	-60,48	-22,96	-1,70	%
ΔSOC turno TOT	-55,82	-7,96	16,30	%
SOC fine turno	39,18	87,04	111,30	%

Tabella 2 – Analisi scenari

Quest’analisi mostra come, a parità di progettazione e installazione dell’impianto, l’effettivo rendimento di ricarica dei veicoli spazi in un intervallo abbastanza ampio in funzione di variabili quali: il numero di pause, la durata delle pause, le abitudini di guida, l’efficienza

³² Si pensi, ad esempio, ad un magazzino nel quale si vuole avere una maggiore certezza di mantenere livelli di carica alti a discapito dell’aumento dell’investimento per l’implementazione dell’impianto.

tecnica dell'impianto e dei veicoli, la gestione logistica. Parametri che, a loro volta, sono influenzati da variabili terze.

Nella “Tabella 3 – Analisi statistica scenari” sono mostrati i valori medi e le relative deviazioni standard per ognuna delle variabili modificate nei 3 diversi scenari presentati.

Statistical analysis		
	Valori medi	Dev.std
		UDM
% tempo su WPT in baia	25,00%	0,15 %
Consumo medio Traz	2533	450,92 W
Consumo medio Misto	2900	556,78 W
Consumo medio ponderato	2490	656,37 W
Intervallo pause	1,75	0,66 h
Tempo medio pausa	0,22	0,05 h
Rendimento dinamico	76,67%	0,10 %
Rendimento statico	83,33%	0,12 %
ΔSOC turno DIN	-28,38%	0,30 %
ΔSOC turno TOT	-15,83%	0,37 %
SOC fine turno	79,17%	0,37 %

Tabella 3 – Analisi statistica scenari

Si noti:

- Il valore -15,83 % è il valore medio dei 3 casi elaborati, Best, Mid, Worst.
 - Differenza media-best case: $|-15,83| + 16,30 = 32,13 \approx 32\%$
 - Differenza media-worst case: $|-55,82| - |15,83| = 39,99 \approx 40\%$

Si osserva che nelle condizioni peggiori (worst), l'effetto sul SoC è maggiormente incisivo, principalmente a causa al crollo del rendimento di ricarica – a sua volta dovuto da comportamenti sbagliati degli operatori e problematiche di impianto – e dall'alto carico di lavoro che comporta una diminuzione dei tempi di ricarica nelle stazioni statiche durante le pause e le operazioni in banchina.

Come anticipato, quest'analisi è stata condotta per altre due estensioni d'impianto, così da comprendere meglio se l'effetto complessivo dei parametri ha più o meno incidenza rispetto alla grandezza dell'impianto progettato:

- Medium: 39,09 % dell'area utile con copertura WPT, caso con impianto progettato per avere un ΔSoC_{turno} compreso tra -5 ÷ 0 %.

- Large: 81,82 % dell'area utile con copertura WPT.

$$\Delta SoC_{turno} \in [-40\%, +30\%]$$

- Corrispondente ad un intervallo complessivo pari a 70 % circa, leggermente meno variabile rispetto al caso progettuale.
- Small: 18,18 % dell'area utile con copertura WPT.

$$\Delta SoC_{turno} \in [-62\%, +5\%]$$

- Corrispondente ad un intervallo complessivo pari a 67 % circa, leggermente meno variabile rispetto al caso progettuale.

Per cui in entrambi i casi, l'effetto complessivo sulla ricarica è leggermente più contenuto rispetto al caso con un'estensione progettuale.

In seguito sono mostrati gli intervalli e i relativi valori medi ottenuti dalle analisi degli impianti nelle diverse condizioni e con le 3 estensioni differenti.

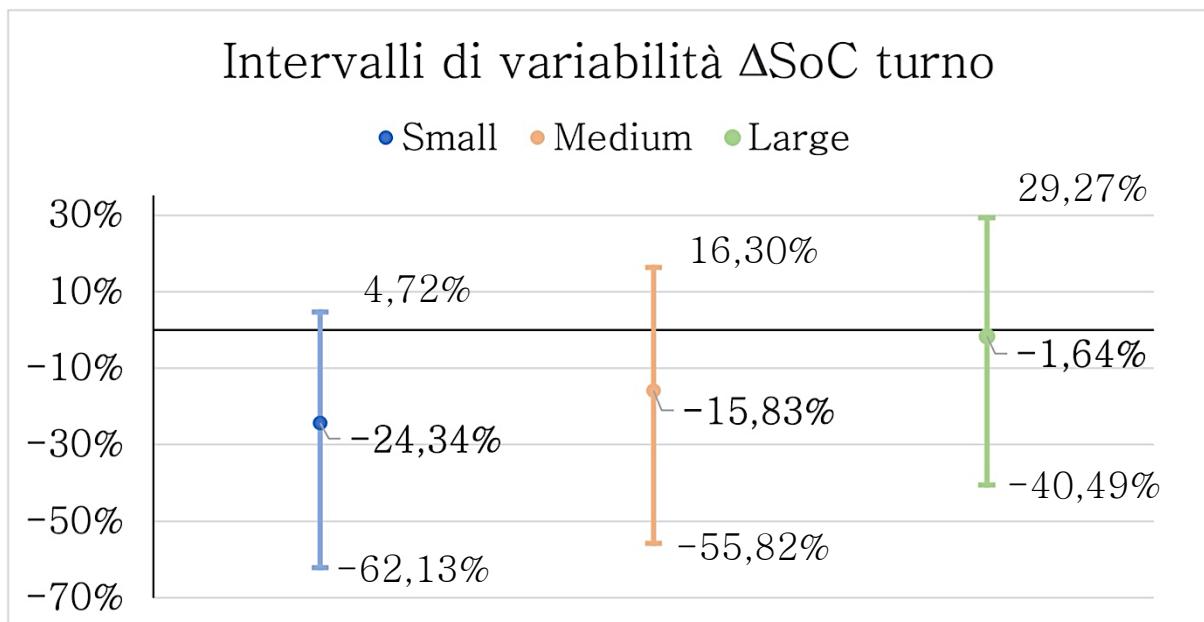


Figura 24 – Intervalli di ΔSoC realizzabili in un turno

4. Manuale d'uso dello strumento

In questo spazio si fornisce un manuale d'uso alla metodologia sviluppata, con un approccio più pragmatico, in modo da avere un supporto sintetico a cui riferirsi nell'utilizzo dello strumento a fronte di differenti casistiche rispetto alle quali l'interlocutore può relazionarsi.

Per le formulazioni matematiche fare riferimento al capitolo “Metodo & Modello”, oppure più sinteticamente al capitolo “Flow Chart di calcolo”.

Sono enfatizzati i passaggi pratici per l'utilizzo e la costruzione del modello, ordinati per punti secondo la sequenza di lavoro da seguire:

1. Come prima operazione vi è l'analisi del caso progettuale, per cui si raccolgono tutti i dati necessari:
 - Planimetria delle aree del magazzino interessate.
 - Eventuali vincoli di installazione dati dalla presenza di impianti incompatibili, strutture portanti, etc.
 - Logica di gestione del magazzino, politiche di turnazione, numero di dipendenti e relative mansioni e tutti gli altri aspetti gestionali che possono interessare l'analisi.
 - Numero e tipologia di veicoli da equipaggiare con il sistema (facendo attenzione alle caratteristiche della batteria e di consumo energetico).

2. Si prosegue analizzando tutte le caratteristiche dimensionali del magazzino, valutando quali modifiche si possono apportare, anche considerando eventuali aumenti di metratura utilizzata a scopo di stoccaggio grazie all'eliminazione di aree adibite al cambio delle batterie, o ancora progettando i punti di installazione delle bobine statiche di ricarica per le pause, in base anche al numero e alla tipologia di banchine presenti, o altre aree di particolare rilevanza.

A questo punto, l'area utile finale di passaggio dei veicoli deve essere discretizzata in celle (aree rettangolari) di dimensioni circa costanti. Per comodità si utilizzi come dimensione del lato un multiplo della dimensione del modulo WPT (2,5 m).

Sarà necessario fare degli aggiustamenti alle dimensioni per adattare le celle alle zone effettivamente percorribili dai veicoli.

Si ottiene, infine, una matrice formata dalle celle che descrivono le differenti porzioni del magazzino, a queste vanno assegnati due pedici per l'identificazione e l'assegnazione di diversi parametri.

3. Risulta utile, ora, calcolare due matrici:

- Equazione (20) – Matrice dei tempi totali di operazione e percorrenza
- Equazione (22) – Matrice dei tempi totali di operazione con collegamento al WPT

A tale scopo è necessario considerare diversi aspetti del magazzino e assegnarne i valori alle rispettive zone, cioè alle singole celle. Tra questi sono previsti:

- Probabilità di stoccaggio: è un parametro che misura la probabilità di effettuare un'operazione in una certa cella. Se il dato è incognito, si può ovviare misurando sul campo con osservazioni sperimentali o tracciamenti di tipo telemetrico.
- Tempi di transito medio: si faccia attenzione a valutare le differenti possibili traiettorie percorribili e sopesarle alla probabilità di avvenimento.
- Effetto delle differenti altezze o altre caratteristiche del magazzino sui tempi di operazione in quel punto.
- Posizioni delle bobine WPT, in questa fase ipotizzate.
- Altre caratteristiche particolari.

Tali matrici sono il frutto del calcolo basato su questi parametri e, in seguito, vanno rapportate per comprendere la quota di tempo medio che un veicolo si trova in condizioni di ricarica dinamica sul tempo totale medio di operazione.

4. In questa fase si rielaborano i valori ottenuti per costruire il modello matematico di ottimizzazione. In particolare si compone di:

- Analisi tempistiche, in questa sezione è necessario ottenere, con criterio statistico, i valori temporali caratteristici del magazzino:
 - Tempo medio per compiere un'operazione e la quota di tempo con ricarica (ottenute a fine punto 4).
 - Tempo di fermo macchina in banchina, utilizzabile per la ricarica statica.
 - Tempi di turno, pausa, intervallo tra le pause, etc.
- Analisi energetica, in questo punto si determinano i profili di carica e scarica delle batterie, trovando l'energia media accumulata (o persa) in un'operazione e in un turno, sono utili i valori di:
 - Consumi energetici medi del veicolo.
 - Potenze medie di carica mediate del rendimento di accoppiamento.
- Analisi economica, è condotta come ultimo elemento a formare il modello e deve comprendere i costi fissi e variabili, con il numero di veicoli e bobine da installare, per il calcolo del costo complessivo dell'impianto.

5. Elemento finale del processo di utilizzo dello strumento, è l'ottimizzazione del modello formato dagli elementi costruiti fino qui.

Per proseguire con l'ottimizzazione è indispensabile riportare il modello matematico in un ambiente di programmazione ed implementare un algoritmo genetico, il quale, variando le possibili posizioni delle bobine nella matrice dedicata, propone una soluzione al problema.

Si presti attenzione nell'assegnazione dei parametri dell'algoritmo e nell'impostazione dei vincoli e delle richieste del problema.

Una volta che l'algoritmo è arrivato a convergenza, sarà infine necessario valutare la buona qualità del risultato proposto ed eventualmente rielaborare, anche sulla base dell'esperienza, l'eventuale soluzione sub-ottimale fornita.

5. Conclusioni

Con questo studio è stato sviluppato un metodo applicativo di analisi della fattibilità energetica e di minimizzazione del costo degli impianti per la ricarica delle batterie elettriche, con tecnologia WPT di *Enermove*, in particolare nelle applicazioni ai veicoli della logistica industriale.

Come mostrato nel capitolo “Verifica del modello”, i risultati stimano i parametri energetici degli impianti, con i quali è stato possibile costruire una prima valutazione economica ed il progetto preliminare per l’implementazione del sistema nei diversi casi riscontrabili. La potenzialità della metodologia sviluppata è ulteriormente espressa nel capitolo *Sviluppi futuri*, dove sono descritti alcuni possibili perfezionamenti del metodo.

Tra i risultati notevoli riscontrati durante questo lavoro di analisi e sintesi vi è l’effetto secondo cui la distribuzione delle bobine sia più conveniente a partire dalle posizioni limitrofe alla banchina per poi installarle allontanandosi da questa fino al raggiungimento del numero di WPT necessario alle esigenze energetico-gestionali del sistema in esame. Questa conseguenza ha significatività nel caso in cui la baia sia l’unica con funzione sia di carico che di scarico merce³³. A parziale conferma di questo risultato è possibile analizzare la matrice delle probabilità, calcolandone la probabilità cumulata in ogni cella, definita dalla sommatoria delle probabilità delle celle più lontane dalla baia rispetto a quella in esame.

Nel caso di logica di magazzino costante si ha una distribuzione di probabilità del seguente tipo, dove i valori nelle differenti celle risulterà lo stesso:

$P =$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

Matrice 14 – Probabilità di stoccaggio [-]

³³ È una semplificazione adottata in questa prima modellazione del problema.

Si ha, difatti:

$$p_{ij} = \frac{1}{n} \quad \forall ij, \quad \text{con } n = (l - 1) \cdot m$$

Equazione (50) – Probabilità costante

Ricordandone l'accezione e configurazione planimetrica, la stessa è rappresentabile come segue.

		BANCHINA									
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
2	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
3	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
4	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
5	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
6	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
7	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
8	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
9	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
10	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Celle	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	

Matrice 15 – Probabilità di stoccaggio in forma planimetrica [-]

Considerando quindi i possibili tragitti percorribili si può dedurre e calcolare, con la seguente formulazione, la matrice delle probabilità cumulate. Si consideri che questa matrice non ha da indicazioni dirette e quantitative rispetto alla progettazione, ma solo una traccia qualitativa di massima per la comprensione del problema.

$$PC_{ij} = \begin{cases} \sum_{i=i_{cella}}^l p_{ij}, & i > 0 \\ \sum_{j=1}^{j_{cella}} \sum_{i=1}^l p_{ij}, & i = 0 \wedge j < j_{ban} \\ \sum_{j=j_{cella}}^m \sum_{i=1}^l p_{ij}, & i = 0 \wedge j > j_{ban} \\ \sum_{j=1}^l \sum_{i=1}^l p_{ij}, & i = 0 \wedge j = j_{ban} \end{cases} \quad \text{Equazione (51) - Probabilità cumulata di stoccaggio}$$

Con:

- j_{ban} = secondo indice della posizione del varco banchina
- j_{cella} = secondo indice della cella interessata
- i_{cella} = primo indice della cella interessata

Risulta, infine:

$\mathbf{PC} =$	0,1	0,2	0,3	0,4	1	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

Matrice 16 – Probabilità di stoccaggio cumulata [-]

Osservano i valori riportati in questa matrice si nota appunto che quelli più limitrofi al varco banchina-area scaffali mostrano probabilità cumulate maggiori, per cui indicano le celle sulla quali si transita di più, cioè quelle maggiormente adatte ad ospitare il sistema di ricarica dinamico.

Come ulteriore risultato è stato evidenziato come sia possibile creare un'analisi predittiva di questi sistemi logistici, rimarcando che tuttavia le soluzioni non sono deterministiche ma spaziano in un intervallo anche molto ampio se si considerano casi limite.

Sono proposte, infine, alcune considerazioni più puntuali, elaborate con l'esperienza accumulata durante questo progetto:

- In un'azienda con un solo turno di lavoro, cioè $8 \div 10 \text{ h/gg}$, l'implementazione del sistema di ricarica WPT dinamico può non essere conveniente in quanto le ricariche potrebbero essere sufficientemente gestite con sistemi statici durante le chiusure tra un turno ed il successivo.
- Per un'azienda che lavora su due turni, cioè $16 \div 20 \text{ h/gg}$, l'analisi presenta aspetti più complessi, ma in linea del tutto generale si può considerare necessario un sistema di ricarica dinamico, in quanto darebbe un contributo sostanziale per non scendere al di sotto del 0% di SoC alla fine dei due turni, considerando anche che il tempo di chiusura, sfruttabile per la ricarica statica, potrebbe essere limitato a $4 - 8 \text{ h}$ ed eventualmente insufficiente per ristabilire un SoC sufficiente alla giornata lavorativa successiva.
- Per tutti gli altri casi con lavoro h24 7/7 si rimanda a tutte le analisi e considerazioni condotte nel capitolo "Modello". A queste si aggiunge il concetto secondo cui un'azienda che non chiude mai, deve avere un SOC a fine turno medio leggermente maggiore di 0% per evitare la fermata dei veicoli, a meno per motivi di manutenzione degli stessi o degli impianti. Diversamente se si fanno scelte gestionali differenti, per le quale ad esempi si decide di fermare in ogni modo i veicoli ad ogni intervallo di tempo stabilito, allora è possibile stimare la perdita di carica percentuale necessaria.
- Con velocità medie dei carrelli maggiori, il SoC a fine turno diminuisce.
- Le correlazioni con gli altri parametri non sono state condotte singolarmente, ma è stato approfondito l'effetto complessivo delle variabili per comprendere quanto affidabili siano le analisi predittive/progettuali condotte con questo metodo.

6. Sviluppi futuri

Come possibile evoluzione e perfezionamento di questo studio, sarà innanzitutto utile implementare un confronto tra sistema WPT e sistemi di gestione di ricarica delle batterie standard, dal quale poi sia possibile valutare un tempo di ammortamento e la convenienza economica che giustifichi questo investimento.

- È anche pensabile di generalizzare ulteriormente il modello considerando ad esempio:
 1. La variabilità del numero e posizione delle banchine.
 2. L'interazione del traffico di più veicoli simultaneamente a lavoro e le conseguenti variazioni tecniche d'impianto.
 3. L'affinamento del metodo per magazzini con piante complesse, varchi tra gli scaffali, stabilimenti su più livelli, etc.
 4. Valutazioni di ulteriori limiti progettuali quali ad esempio:
 - Passaggio impianti idraulici, elettrici, elementi portanti o altri ostacoli in punti di installazione WPT.
 - Incompatibilità elettromagnetiche di elementi circostanti.
- È immaginabile anche variare l'approccio alla problematica, ad esempio utilizzando una heatmap che tracci il tempo complessivo trascorso da un veicolo nelle diverse celle, in un certo periodo (turno/i), comprendendo quali zone siano le più visitate così da installarvi l'impianto.

Questa mappa è ottenibile in diversi modi:

 - Con osservazioni sperimentali, cioè andando a sensorizzare i veicoli da tracciare (ad esempio con telemetria). Utile se il magazzino è già attivo nella condizione gestionale che si presenterà anche dopo l'installazione dell'impianto e vi siano le condizioni per le osservazioni. Ovviamente le indagini sono da condursi considerando e mediando diversi momenti della settimana e dell'anno per non incorrere in misure falsate.
 - Con l'utilizzo di un software di simulazione dedicato, con il quale sia possibile ricostruire il sistema logistico con le sue caratteristiche. Questo metodo trova utilità nei casi in cui il magazzino di progetto sia ancora in fase di costruzione.

- È utile, inoltre, condurre le analisi di verifica modello variando i parametri uno alla volta, o magari studiando dei piani fattoriali dedicati, comprendendo così le singole correlazioni rispetto al risultato complessivo.
- Può risultare interessante analizzare gli impianti per differenti tipologie di veicoli ed in particolare quelli gestiti con AGV, per cui si avranno caratteristiche e particolarità differenti, ad esempio: maggiore affidabilità del corretto concatenamento con l'impianto, programmazione dei percorsi per ottimizzare la ricarica, etc.
- Si può proseguire nello studio creando scenari su differenti turnazioni, politiche di gestione ed utilizzo dei magazzini e dei veicoli, aggiungendo ulteriori caratteristiche al modello, come il numero di dipendenti ed i rispettivi ruoli, il numero di veicoli, etc.

7. Bibliografia

- [1] A. Schmidt, A. Ivanova e M. S. Schäfer, «Media attention for climate change around the world: A comparative analysis of newspaper coverage in 27 countries,» *Elsevier*, 2013.
- [2] P. Lazzeroni, V. Cirimele e A. Canova, «Economic and environmental sustainability of Dynamic Wireless Power Transfer for electric vehicles supporting reduction of local air pollutant emissions,» *Elsevier*, 2020.
- [3] European Environment Agency, «Air pollution still too high across Europe,» 10 Dicembre 2019. [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/highlights/air-pollution-still-too-high>.
- [4] United Nations, General Assembly, «Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development,» 4th plenary meeting, 25 September 2015.
- [5] European Environment Agency, «Primary energy consumption by fuel in Europe,» [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/primary-energy-consumption-by-fuel-7/assessment>.
- [6] U.S. Energy Information Administration, «Use of energy explained: Energy use for transportation,» 2019. [Online]. Available: <https://www.eia.gov/energyexplained/use-of-energy/transportation.php>.
- [7] C. S. Thomas, «Range Limitations of Battery Electric Vehicles,» in *Sustainable Transportation Options for the 21st Century and Beyond*, Springer International Publishing Switzerland, 2015.
- [8] A. Shukla, K. Verma e R. Kumar, «Consumer Perspective based Placement of Electric Vehicle Charging Stations by Clustering Techniques,» *IEEE Xplore*, 2016.
- [9] marketsandmarkets, «Wireless Power Transmission Market by Technology (Induction, Magnetic Resonance), Implementation, Transmitter, and Receiver Application (Smartphones, Electric Vehicles, Wearable Electronics, and Furniture) and Geography – Global Forecast to 2022,» 2017. [Online]. Available:

<https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/wireless-power-market-168050212.html>.

- [10] V. Cirimele, F. Freschi e P. Guglielmi, «Wireless Power Transfer Structure Design for Electric Vehicle in Charge While Driving,» *IEEE Xplore*, 2014.
- [11] ENERMOVE srl, «Dynamic Wireless Charging Ricarica batterie rapida, sicura ed ecologica...4.0!,» Torino, 2019.
- [12] K. Mongird, V. Viswanathan, P. Balducci, J. Alam, V. Fotedar, V. Koritarov e B. Hadjerioua, «Energy Storage Technology and Cost Characterization Report,» Pacific Northwest National Laboratory, U.S. Department of Energy, 2019.
- [13] Battery Council International, and Battery University, «Forklift Battery Basics,» Power Designers USA LLC, 2017.
- [14] Battery Handling Systems Inc., «Best Safety Practices for Forklift Battery Charging and Handling,» 2015. [Online]. Available: <https://na.bhs1.com/wp-content/uploads/2015/03/SM-1129-Best-Safety-Practices-for-Forklift-Battery-Charging-and-Handling.pdf>.
- [15] A. Alshaabi, H. Dauod e J. Weiss, «Evaluation of Different Forklift Battery Systems Using Statistical Analysis and Discrete Event Simulation,» in *Industrial and Systems Engineering Conference* K. Coperich, E. Cudney, H. Nembhard, eds., 2017.
- [16] P. T. lift, «FORKLIFT BATTERIES THINGS YOU NEED TO KNOW BEFORE YOU BUY,» [Online]. Available: <https://pittsburgh-forklifts.com/wp-content/uploads/2018/12/Forklift-Battery-Charging-Methods-9-1-18.pdf>.
- [17] Enermove Srl, «Immagine fornita su gentile concessione».
- [18] S. P. Subudhi e S. Krithiga, «Wireless Power Transfer Topologies used for Static and Dynamic Charging of EV Battery: A Review,» *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, 2020.
- [19] V. Cirimele, M. Diana, F. Freschi e M. Mitolo, «Inductive Power Transfer for Automotive Applications: State-of-the-Art and Future Trends,» *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, vol. 54, n. 5, 2018.

- [20] J. Aqeel Mahmood, R. Nordin, G. Sadik Kamel, J. Haider Mahmood e I. Mahamod, «Opportunities and Challenges for Near-Field Wireless Power Transfer: A Review,» *Energies*, 2017.
- [21] W. Elektronik, «Trilogy of Wireless Power Transfer: BASIC PRINCIPLES, WPT SYSTEMS AND APPLICATION,» [Online]. Available: https://www.we-online.com/catalog/media/o208227v410%20DesignGuide_Wireless-Power_Application.pdf.
- [22] S. Laporte, G. Coquery, V. Deniau, A. De Bernardinis e N. Hautière, «Dynamic Wireless Power Transfer Charging Infrastructure for Future EVs: From Experimental Track to Real Circulated Roads Demonstrations,» *World Electric Vehicle Journal*, 2019.
- [23] V. Cirimele, R. Torchio, J. L. Villa, F. Freschi, P. Alotto, L. Codicosa e L. Di Rienzo, «Uncertainty Quantification for SAE J2954 Compliant Static Wireless Charge Components,» *IEEE Access*, 2020.
- [24] V. Cirimele, «Studio di fattibilità ricarica wireless dinamica in ambito industriale,» C.d.B. di Cavallo Flavio & C. Sas, Torino, 2018.
- [25] D. Kim, A. Abu-Siada e A. Sutinjo, «State-of-the-art literature review of WPT: Current limitations and solutions on IPT,» *Elsevier*, pp. 494–501, 2017.
- [26] V. Cirimele, R. Torchio, A. Virgillito, F. Freschi e P. Alotto, «Challenges in the Electromagnetic Modeling of Road Embedded Wireless Power Transfer,» *Energies*, 2019.
- [27] Y. J. Jang, «Survey of the operation and system study on wireless charging electric vehicle systems,» *Elsevier*, vol. Transportation Research, 2018.
- [28] R. Torchio, V. Cirimele, P. Alotto e F. Freschi, «Modelling of road-embedded transmitting coils for wireless power transfer,» *Elsevier*, 2020.
- [29] V. Cirimele, O. Smiai, P. Guglielmi, F. Bellotti, R. Berta e A. De Gloria, «Maximizing Power Transfer for Dynamic Wireless Charging Electric Vehicles,» *Springer International Publishing*, 2018.
- [30] R. Ruffo, V. Cirimele, M. Diana, M. Khalilian, A. La Ganga e P. Guglielmi, «Sensorless Control of the Charging Process of a Dynamic Inductive Power Transfer System With an

- Interleaved Nine-Phase Boost Converter,» *IEEE*, vol. TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, 2018.
- [31] C. Vincenzo, Design and integration of a dynamic IPT system for automotive applications, Torino: UNIVERSITE PARIS-SACLAY e Politecnico di Torino, 2017.
- [32] Z. Chen, W. Liu e Y. Yin, «Deployment of stationary and dynamic charging infrastructure for electric vehicles along traffic corridors,» *Elsevier*, 2017.
- [33] Z. Khan, M. Chowdhury, S. M. Khan, I. Safro e H. Ushijima-Mwesigwa, «Utility Maximization Framework for Opportunistic Wireless Electric Vehicle Charging,» *ResearchGate*, 2017.
- [34] H. Ngo, A. Kumar e S. Mishra, «Optimal positioning of dynamic wireless charging infrastructure in a road network for battery electric vehicles,» *Elsevier*, 2020.
- [35] M. D. Summa, Note del corso di Ricerca Operativa, Padova: Universit`a degli Studi di Padova, 2012.
- [36] G. Gallo, S. Pallottino, M. G. Scutellà, A. Frangioni, G. Bigi, P. Cappanera e M. P. Scaparra, Appunti di Ricerca Operativa, Pisa: Gruppo di Ricerca Operativa del Dipartimento di Informatica dell'Universita` di Pisa.
- [37] R. C. d. L. i. I. Informatica, Appunti dalle lezioni di Ricerca Operativa, Roma: Università di Roma “La Sapienza”, 2004.
- [38] M. Liverani, Dispense del corso di Ottimizzazione Combinatoria: Problemi di Ottimizzazione e Programmazione Matematica, Roma: Università degli Studi Roma Tre, 2014.
- [39] L. B. Luigi De Giovanni, Ricerca Operativa: Modelli di Programmazione Lineare.
- [40] A. Simi, Implementazione di algoritmi genetici multiobiettivo distribuiti in ambiente Matlab, Pisa, 2008.
- [41] A. Hassanat, K. Almohammadi, E. Alkafaween, E. Abunawas, A. Hammouri e V. B. S. Prasath, «Choosing Mutation and Crossover Ratios for Genetic Algorithms—A Review with a New Dynamic Approach,» *Information*, 2019.

Bibliografia

- [42] Y. Kaya, M. Uyar e R. Tekin, «A Novel Crossover Operator for Genetic Algorithms: Ring Crossover,» *ResearchGate*, 2011.
- [43] A. Chipperfield, P. Fleming, H. Pohlheim e C. Fonseca, Genetic Algorithm TOOLBOX: For Use with MATLAB, University of Sheffield.
- [44] MathWorks, Matlab Global Optimization Toolbox User's Guide, 2015.
- [45] J. Hižak e R. Logožar, «AN OVERVIEW OF THE GENETIC ALGORITHM AND ITS USE FOR FINDING EXTREMA — WITH IMPLEMENTATIONS IN MATLAB,» *Tehnički glasnik*, 2016.
- [46] X. Li, L. Yang, Z. Xu, Y. Wu, S. Liu e C. Cai, «A communication-free WPT system based on transmitter-side hybrid topology switching for battery charging applications,» *AIP Advances*, 2020.
- [47] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, «GUIDELINES FOR LIMITING EXPOSURE TO TIME-VARYING ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS (1 Hz TO 100 kHz),» *HEALTH PHYSICS*, 2010.
- [48] J. Karasek, «An Overview of Warehouse Optimization,» *ResearchGate*, vol. International Journal of Advances in Telecommunications Electrotechnics Signals and Systems, 2013.
- [49] A. Monte, Elementi di impianti industriali, Volume I, Quarta edizione, Torino: Edizioni Libreria Cortina Torino, 2003.

8. Appendice

8.1 Flow Chart di calcolo

Si riporta, per facilitarne la lettura, tutto il flusso di calcolo condotto nella modellazione del problema, con un approccio estremamente sintetico.

1. Equazione (1) – Quantificazione celle

$$l = \frac{\text{lunghezza magazzino (Lu)}}{\text{lunghezza ipotizzata cella media (x)}}$$

$$m = \frac{\text{larghezza magazzino (La)}}{\text{larghezza ipotizzata cella media (y)}}$$

2. Equazione (2) – Matrice indici

$$ij = \begin{bmatrix} 0,1 & \cdots & 0,m \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ l,1 & \cdots & l,m \end{bmatrix}$$

3. Equazione (4) – Probabilità costante, si ricorda come con qualunque distribuzione probabilistica la sommatoria delle stesse debba essere pari ad 1

$$p_{ij} = \frac{1}{n} \quad \forall ij, \quad \text{con } n = (l - 1) \cdot m$$

4. Equazione (7) – Tempo di percorrenza cella

$$\bar{t}_{a_{ij}} = \frac{t_{r_{ij}}}{\bar{v}}$$

$$t_{r_{ij}} = \begin{cases} l_{u_{ij}}, & \text{transito verticale} \\ l_{a_{ij}}, & \text{transito orizzontale} \\ l_{x_{ij}}, & \text{caso particolare} \end{cases}$$

Esempio caso semicurva:

$$t_{r_{ij}} = r_{ij} \cdot \theta, \quad \text{con } \theta = 90^\circ, \quad r_{ij} = \frac{\max(l_{a_{ij}}, l_{u_{ij}})}{2}$$

5. Equazione (12) – Tempo medio di operazione

$$\bar{t}_{o_{ij}} = h_{ij} \cdot \bar{T}_{hp}$$

6. Equazione (15) – Ubiche con/senza WPT, posizioni delle bobine

$$w_{ij} = \{0, 1\} \in \mathbb{Z}$$

7. Equazione (17) – Totale WPT installate

$$n_{celle.WPT} = \sum_{i=0}^l \sum_{j=1}^m w_{ij}$$

8. Equazione (18) – Percentuale di area con WPT sul totale

$$WPT_{area} = \frac{\sum_{i=0}^l \sum_{j=1}^m w_{ij}}{l \cdot m}$$

9. Equazione (19) – Tempi totali di operazione e percorrenza

$$\bar{t}_{t_{ij}} = \begin{cases} 2 \cdot \left(\sum_{j=j_{ban}}^{j_{in}} \bar{t}_{a_{0j}} + \sum_{i=1}^{i_{fin}} \bar{t}_{a_{ij_{in}}} \right) + \bar{t}_{o_{ij}}, & j_{ban} < j_{in} \\ 2 \cdot \sum_{i=0}^{i_{fin}} \bar{t}_{a_{ij_{ban}}} + \bar{t}_{o_{ij}}, & j_{ban} = j_{in} \\ 2 \cdot \left(\sum_{j=j_{in}}^{j_{ban}} \bar{t}_{a_{0j}} + \sum_{i=1}^{i_{fin}} \bar{t}_{a_{ij_{in}}} \right) + \bar{t}_{o_{ij}}, & j_{ban} > j_{in} \end{cases}$$

10. Equazione (21) – Tempi totali di operazione collegati al WPT

$$\bar{t}_{tw_{ij}} = \begin{cases} 2 \cdot \left(\sum_{j=j_{ban}}^{j_{in}} \bar{t}_{a_{0j}} \cdot w_{ij} + \sum_{i=1}^{i_{fin}} \bar{t}_{a_{ij_{in}}} \cdot w_{ij} \right) + \bar{t}_{o_{ij}} \cdot w_{ij}, & j_{ban} < j_{in} \\ 2 \cdot \sum_{i=0}^{i_{fin}} \bar{t}_{a_{ij_{ban}}} \cdot w_{ij} + \bar{t}_{o_{ij}} \cdot w_{ij}, & j_{ban} = j_{in} \\ 2 \cdot \left(\sum_{j=j_{in}}^{j_{ban}} \bar{t}_{a_{0j}} \cdot w_{ij} + \sum_{i=1}^{i_{fin}} \bar{t}_{a_{ij_{in}}} \cdot w_{ij} \right) + \bar{t}_{o_{ij}} \cdot w_{ij}, & j_{ban} > j_{in} \end{cases}$$

11. Equazione (23) – Tempo totale di operazione pesato sulle probabilità

$$\bar{\bar{t}}_{tij} = \bar{t}_{tij} \cdot p_{ij}$$

12. Equazione (25) – Tempi totali di operazione collegati al WPT pesati sulle probabilità

$$\bar{\bar{t}}_{twij} = \bar{t}_{twij} \cdot p_{ij}$$

13. Semplificazione grafica

$$\sum = \sum_{i=0, j=1}^l \sum_{j=1}^m \dots$$

14. Equazione (27) – Tempo medio pesato per operazione

$$\bar{\bar{T}}_t = \frac{\sum \bar{\bar{t}}_{tij}}{(l-1) \cdot m}$$

15. Equazione (28) – Tempo medio pesato di operazione con collegamento al WPT

$$\bar{\bar{T}}_{tw} = \frac{\sum \bar{\bar{t}}_{twij}}{(l-1) \cdot m}$$

Oppure anche:

$$\bar{\bar{T}}_{tw} = \bar{\bar{T}}_{tw\%} \cdot \bar{\bar{T}}_t$$

16. Equazione (29) – Quota di tempo medio pesato di operazione con ricarica

$$\bar{\bar{T}}_{tw\%} = \frac{\bar{\bar{T}}_{tw}}{\bar{\bar{T}}_t} = \frac{\sum \bar{\bar{t}}_{twij}}{\sum \bar{\bar{t}}_{tij}} \cdot 100$$

17. Equazione (30) – Tempo medio di ricarica durante operazione in banchina

$$\bar{T}_{bw} = \bar{T}_{bw\%} \cdot \bar{T}_b$$

18. Equazione (31) – Tempo complessivo medio ponderato di operazione

$$\bar{\bar{T}}_c = \bar{\bar{T}}_t + \bar{T}_b$$

19. Equazione (32) – Tempo complessivo medio ponderato di ricarica in operazione media

$$\bar{\bar{T}}_{cw} = \bar{\bar{T}}_{tw} + \bar{T}_{bw}$$

20. Equazione (33) – Consumo istantaneo medio ponderato del veicolo

$$\bar{\bar{P}} = \frac{P_{max} \cdot (\bar{P}_{\%traz} \cdot (\bar{\bar{T}}_t - \bar{\bar{T}}_o) + \bar{P}_{\%misto} \cdot (\bar{T}_b + \bar{\bar{T}}_o - \bar{T}_{bw}))}{\bar{\bar{T}}_c}$$

21. Equazione (34) – Numero di pause in un turno

$$\bar{n}_{pause} = arr.ecc. \left(\frac{T_{hturno}}{\bar{T}_{hinter} + \bar{T}_{hpausa}} \right)$$

22. Equazione (35) – Tempo totale di pausa in un turno

$$\bar{T}_{hpausE} = \bar{n}_{pause} \cdot \bar{T}_{hpausa}$$

23. Equazione (36) – Energia totale immagazzinabile in batteria

$$E = V \cdot Ah \cdot 3600$$

24. Equazione (37) – Numero di operazione in un turno di lavoro

$$\bar{n}_{op} = arr.ecc. \left(\frac{T_{turno} - \bar{T}_{pausE}}{\bar{\bar{T}}_c} \right)$$

25. Equazione (38) – Energia accumulata in un'operazione

$$\bar{E}_{opacc_{din}} = P_{nom} \cdot (\eta_{din} \cdot \bar{\bar{T}}_{tw} + \eta_{stat} \cdot \bar{\bar{T}}_{bw})$$

26. Equazione (39) – Energia consumata in un'operazione

$$\bar{\bar{E}}_{opcons} = \bar{\bar{P}} \cdot \bar{\bar{T}}_c$$

27. Equazione (40) – Variazione energia in batteria in un'operazione

$$\Delta \bar{\bar{E}}_{op} = \bar{\bar{E}}_{opacc_{din}} - \bar{\bar{E}}_{opcons}$$

28. Equazione (41) – Variazione SoC in un turno, solo contributo ricarica dinamica

$$\Delta \overline{\overline{SoC}}_{turno_{din}} = \frac{\Delta \bar{\bar{E}}_{op} \cdot \bar{n}_{op}}{E}$$

29. Equazione (42) – Energia accumulata dal sistema statico nel turno

$$\bar{E}_{turno_{accstat}} = P_{nom} \cdot \bar{T}_{pause} \cdot \eta_{stat}$$

30. Equazione (43) – Variazione energia in batteria nel turno

$$\Delta \bar{\bar{E}}_{turno} = \bar{\bar{E}}_{turno_{acc_{din}}} + \bar{E}_{turno_{accstat}} - \bar{\bar{E}}_{turno_{cons}}$$

31. Equazione (44) – Variazione SoC nel turno

$$\Delta \overline{\overline{SoC}}_{turno} = \frac{\Delta \bar{\bar{E}}_{turno}}{E}$$

32. Equazione (45) – SoC batteria a fine turno

$$\overline{\overline{SoC}}_{finale} = SoC_{iniz} + \Delta \overline{\overline{SoC}}_{turno}$$

33. Equazione (46) – Costo totale d'impianto

$$C_{tot} = C_{fix} + c_{rec} \cdot n_{veic} + c_{WPT} \cdot n_{mod.WPT}$$

34. Equazione (47) – Numero totale di bobine installate

$$n_{mod.WPT} = \frac{\left(\sum_{i=0}^l \sum_{j=1}^m w_{ij} \cdot \max(l_{a_{ij}}, l_{u_{ij}}) \right)}{l_{modWPT}} + n_{modWPT_{stat}}$$

35. Modello matematico

$$\text{Minimizza: } C_{tot}(n_{mod.WPT})$$

Vincolato a,

$$\Delta \overline{SoC}_{turno} > \Delta SoC_{turno_{cliente}},$$

$$n_{disc} < n_{disc.MAX}$$

$$n_{disc_{oriz}} < n_{disc.MAX_{oriz}}$$

Con,

$$\Delta \overline{SoC}_{turno} \propto n_{mod.WPT}$$

$$C_{tot} \propto n_{mod.WPT}$$

$$n_{disc} = \sum_{i=0}^{l-1} \sum_{j=1}^m |w_{i, j} - w_{i+1, j}| \propto \text{alla distribuzione topologica dei } n_{mod.WPT}$$

$$n_{disc_{oriz}} = \sum_{j=1}^{m-1} |w_j - w_{j+1}| \propto \text{alla distribuzione topologica dei } n_{mod.WPT}$$

8.2 Listati Matlab

Sono presentati i codici scritti in linguaggio Matlab – programma MATLAB® R2020b – che sono stati utilizzati per ottimizzare il modello sviluppato con un algoritmo genetico, implementato nell’ambiente Matlab stesso.

Il programma si divide in 3 codici:

1. Un programma principale “MainWPT.m”, che richiama le matrici costruite durante il processo di implementazione del metodo ed imposta i parametri dell’algoritmo genetico.
2. Un programma “CostFun.m” che modellizza la funzione di costo totale da ottimizzare.
3. Un programma “MyConstr.m” che imposta i vincoli del modello da ottimizzare.

8.2.1 Algoritmo genetico: MainWPT.m

```
clear
close all
clc

%% Importazione variabili da Excel e salvataggio dati
l = readmatrix('Calcoli_magazzino.xlsx','Range','O26:O26'); % Numero righe matrici
m = readmatrix('Calcoli_magazzino.xlsx','Range','O27:O27'); % Numero colonne matrici
save('l','l');
save('m','m');

P = readmatrix('Calcoli_magazzino.xlsx','Range','C12:L22'); % Matrice logica di stoccaggio
save('P','P');

Lu = readmatrix('Calcoli_magazzino.xlsx','Range','C34:L44'); % Matrice lunghezze celle
save('Lu','Lu');

La = readmatrix('Calcoli_magazzino.xlsx','Range','C54:L64'); % Matrice larghezze celle
save('La','La');

% v = readmatrix('Calcoli_magazzino.xlsx','Range','Q44:Q44'); % Velocità media carrello

Ta = readmatrix('Calcoli_magazzino.xlsx','Range','C76:L86'); % Matrice tempi attraversamento:
Ta = max(Lu,La)./v;
save('Ta','Ta');

%H = readmatrix('Calcoli_magazzino.xlsx','Range','C98:L108'); % Matrice coefficienti altezze
scaffali
%Thp = readmatrix('Calcoli_magazzino.xlsx','Range','Q119:Q119'); % Ipotesi tempo medio
operazione scaffali

TO = readmatrix('Calcoli_magazzino.xlsx','Range','C119:L129'); % Matrice tempi operazione
scaffali: TO = H * Thp;
save('TO','TO');

Wpt = readmatrix('Calcoli_magazzino.xlsx','Range','C141:L151'); % Matrice posizioni WPT [0,1]

Lwpt = readmatrix('Calcoli_magazzino.xlsx','Range','I300:I300'); % Lunghezza modulo WPT
save('Lwpt','Lwpt');

Tb = readmatrix('Calcoli_magazzino.xlsx','Range','C248:C248'); % Tempo medio operazione in
banchina
save('Tb','Tb');
```

Appendice

```
Twbx = readmatrix('Calcoli_magazzino.xlsx','Range','B249:B249'); % Percentuale tempo op.  
banchina COLLEGATO WPT  
save('Twbx','Twbx');  
  
Pmax = readmatrix('Calcoli_magazzino.xlsx','Range','C254:C254'); % Potenza di picco dichiarata  
veicolo  
save('Pmax','Pmax');  
  
Ptraz = readmatrix('Calcoli_magazzino.xlsx','Range','B255:B255'); % Consumo medio percentuale  
trazione  
save('Ptraz','Ptraz');  
  
Pmix = readmatrix('Calcoli_magazzino.xlsx','Range','B256:B256'); % Consumo medio percentuale  
misto  
save('Pmix','Pmix');  
  
Tturno = readmatrix('Calcoli_magazzino.xlsx','Range','C261:C261'); % Durata turno  
save('Tturno','Tturno');  
  
Tpausa = readmatrix('Calcoli_magazzino.xlsx','Range','C262:C262'); % Durata pausa  
save('Tpausa','Tpausa');  
  
Tinter = readmatrix('Calcoli_magazzino.xlsx','Range','C263:C263'); % Intervallo tra pause  
save('Tinter','Tinter');  
  
V = readmatrix('Calcoli_magazzino.xlsx','Range','B269:B269'); % Tensione alimentazione  
batteria  
save('V','V');  
  
Ah = readmatrix('Calcoli_magazzino.xlsx','Range','B270:B270'); % Capacità batteria  
save('Ah','Ah');  
  
Pnom = readmatrix('Calcoli_magazzino.xlsx','Range','B274:B274'); % Potenza nominale impianto  
WPT  
save('Pnom','Pnom');  
  
Eta_st = readmatrix('Calcoli_magazzino.xlsx','Range','B278:B278'); % Rendimento statico WPT  
save('Eta_st','Eta_st');  
  
Eta_din = readmatrix('Calcoli_magazzino.xlsx','Range','B277:B277'); % Rendimento dinamico WPT  
save('Eta_din','Eta_din');  
  
nveic = readmatrix('Calcoli_magazzino.xlsx','Range','D302:D302'); % Numero di veicoli  
save('nveic','nveic');
```

Appendice

```
Crec = readmatrix('Calcoli_magazzino.xlsx','Range','B302:B302'); % Costo Receiver
save('Crec','Crec');

Cwpt = readmatrix('Calcoli_magazzino.xlsx','Range','B303:B303'); % Costo modulo WPT
save('Cwpt','Cwpt');

Cfix = readmatrix('Calcoli_magazzino.xlsx','Range','B300:B300'); % Costi fissi
save('Cfix','Cfix');

%% Algoritmo di ottimizzazione
tic

% Funzioni di ottimizzazione del modello
f = @CostFun; % Funzione costo da minimizzare

MC = @MyConstr; % Funzione vincoli

% Parametri liberi [Indicare in MyConstr.m: DeltaSoc desiderato riga 192]

jban = 5; % Indice posizione varco banchina-magazzino
save('jban','jban');

nvar = numel(Wpt);

% Inizializzo nwpt
nwpt_save = nvar * 2 + 5;
save('nwpt_save','nwpt_save');

rng(1,'simdTwister') % Per riproducibilità dei risultati

% *** Algoritmo Genetico 'ga' ***
PopulationSize = 200; % Impostazione parametri
InitPopMatrix = reshape(Wpt,1,[]);

options = optimoptions ('ga',
    ...
    'PopulationSize' , PopulationSize,
    ...
    'EliteCount' , ceil(0.2*PopulationSize),
    ...
    'CrossoverFraction' , 0.98,
    ...
    ...'InitialPopulationMatrix', InitPopMatrix,
    ...
    ...'FitnessScalingFcn' , 'fitscalingshiftlinear', ... fitscalingtop
    ...'NonlinearConstraintAlgorithm', 'penalty', ... penalty auglag
    ...'ConstraintTolerance' , 1.0000e-02,
    ...
    ...'FunctionTolerance' , 2500,
    ...
    'MaxStallGenerations' , 25,
```

Appendice

```
... 'MaxStallTime' , 60, ...
... 'MaxTime' , 5, ...
... 'MaxGenerations' , 50, ...
... 'Display' , 'diagnose', ...
'PlotFcn' , {@gaplotstopping, []} ... @gaplotrange, @gaplotbestf,
@gaplotscorediversity, @gaplotscores
)

[X,fval,exitflag,output] = ga(f,110,[],[],[],zeros(1,nvar),ones(1,nvar),MC,1:nvar,options)

% save('final_pop','final_pop'); % Utile per ripartire con l'ultima popolazione della precedente ottimizzazione

%% Risultati
W = reshape(X,[1,m]);

for i=2:l
    for j=1:m
        WCorsia(i,j) = sum(W(1:i-1,j));
        if WCorsia(i,j)== i-1 && W(i,j) == 1
            W(i,j) = 1;
        else
            W(i,j) = 0;
        end
    end
end
W;

for i = 1:l;
    for j = 1:m;
        z(i,j) = W(i,j).* max(La(i,j), Lu(i,j));
    end
end
nwpt = ceil(sum(z,'all')/Lwpt)+1

figure(1)
subplot(4,1,[3,4]);
heatmap(W, 'Title', 'Posizioni WPT nel Magazzino', ...
        'XLabel', 'Corsie', ...
        'YLabel', 'Celle');

writematrix(W,'Calcoli_magazzino.xlsx','Range','C141:L151'); % Scrittura nuova Matrice delle posizioni su Excel
Time = toc % FINE Ottimizzazione
```

8.2.2 Funzione di ottimizzazione: CostFun.m

```

function Ctot = CostFun(Wpt)      % Funzione di Costo Totale d'Impianto
%% Lettura variabili importate da Excel

load('l','l');
load('m','m');
load('Lu','Lu');
load('La','La');
load('Lwpt','Lwpt');
load('nveic','nveic');
load('Crec','Crec');
load('Cwpt','Cwpt');
load('Cfix','Cfix');

%% Elaborazione variabili Wpt inserite nella matrice posizioni

W = reshape(Wpt(1,:), [1,m]);      % L'algoritmo genetico genera una stringa 110x1, la rendo 1*m

for i=2:l
    for j=1:m
        WCorsia(i,j) = sum(W(1:i-1,j));
        if WCorsia(i,j) == i-1 && W(i,j) == 1
            W(i,j) = 1;
        else
            W(i,j) = 0;
        end
    end
end

%% Flusso di calcolo

% Numero di Transmitters (Moduli WPT o coppia di bobine)
for i = 1:l;
    for j = 1:m;
        y(i,j) = W(i,j) .* max ( La(i,j) , Lu(i,j) ) ;
    end
end

nwpt = ceil(sum(y,'all')/Lwpt)+1;      % +1 per conteggiare la stazione di ricarica statica che
non è parametrizzata

Ctot = Cfix + nwpt * Cwpt + nveic * Crec;          % Funzione di costo

% save('Ctot','Ctot');

```

Appendice

```
%% Salvataggio soluzione migliore trovata nel corrente processo di ottimizzazione
```

```
if nwpt < nwpt_save  
    nwpt_save = nwpt  
    save('nwpt_save', 'nwpt_save');  
    save('W', 'W');  
    toc  
end
```

```
%% Grafici
```

```
figure(1)  
subplot(4,1,2);  
plot(nwpt,Ctot,'ro');  
hold on;  
title('Numero di bobine WPT installate - Costo totale di impianto');  
xlabel('Numero di WPT');  
ylabel('Costo Totale');  
grid on;
```

```
Ctot; % Costo Totale --> Fine funzione!
```

8.2.3 Funzione di vincolo: MyConstr.m

```
function [c, ceq] = MyConstr(Wpt) % Funzione di vincolo del modello
%% Lettura variabili importate da Excel

load('l','l');
load('m','m');
load('P','P');
load('Lu','Lu');
load('La','La');
load('Ta','Ta');
load('TO','TO');
load('Lwpt','Lwpt');
load('jban','jban');
load('Tb','Tb');
load('Twbx','Twbx');
load('Pmax','Pmax');
load('Ptraz','Ptraz');
load('Pmix','Pmix');
load('Tturno','Tturno');
load('Tpausa','Tpausa');
load('Tinter','Tinter');
load('V','V');
load('Ah','Ah');
load('Pnom','Pnom');
load('Eta_st','Eta_st');
load('Eta_din','Eta_din');

%% Elaborazione variabili Wpt inserite nella matrice posizioni

W = reshape(Wpt(1,:), [1,m]); % L'algoritmo genetico genera una stringa 110x1, la rendo 1xm

% Vincolo di continuità d'impianto

for i=2:l
    for j=1:m
        WCorsia(i,j) = sum(W(1:i-1,j));
        if WCorsia(i,j) == i-1 && W(i,j) == 1
            W(i,j) = 1;
        else
            W(i,j) = 0;
        end
    end
end
W;

WW = sum(W, 'all');
```

Appendice

```
%> Flusso di calcolo [Con 'x' indico '%']
% Matrice tempi totali operazione
...TT = readmatrix('Calcoli_magazzino.xlsx','Range','C163:L173');

for i = 1:l;
    for j = 1:m;
        if j > jban;
            TT(i,j) = 2*(sum(Ta(2:i,j)) + sum(Ta(1,jban:j))) + TO(i,j);
        elseif j == jban;
            TT(i,j) = 2*(sum(Ta(1:i,j))) + TO(i,j);
        else j < jban;
            TT(i,j) = 2*(sum(Ta(2:i,j)) + sum(Ta(1,j:jban))) + TO(i,j);
        end
    end
end
TT;

% Matrice tempi totali operazione COLLEGATO AL WPT
...Ttw = readmatrix('Calcoli_magazzino.xlsx','Range','C185:L195');

for i = 1:l;
    for j = 1:m;
        if j > jban;
            Ttw(i,j) = 2*(sum(W(2:i,j).*Ta(2:i,j)) + sum(W(1,jban:j).*Ta(1,jban:j))) +
W(i,j).*TO(i,j);
        elseif j == jban;
            Ttw(i,j) = 2*(sum(W(1:i,j).*Ta(1:i,j)) + W(i,j).*TO(i,j));
        else j < jban;
            Ttw(i,j) = 2*(sum(W(2:i,j).*Ta(2:i,j)) + sum(W(1,j:jban).*Ta(1,j:jban))) +
W(i,j).*TO(i,j);
        end
    end
end
Ttw;

T = P.*TT*100; % Matrice tempi totali operazione pesati su probabilità
...T = readmatrix('Calcoli_magazzino.xlsx','Range','C207:L217');

tw = P.*Ttw*100; % Matrice tempi totali operazione COLLEGATO AL WPT pesati su probabilità
...tw = readmatrix('Calcoli_magazzino.xlsx','Range','C229:239');

Tt = sum(T,'all')/((l-1)*m); % Tempo medio operazione

Tw = sum(tw,'all')/((l-1)*m); % Tempo medio operazione COLLEGATO AL WPT

TO = sum(TO,'all')/((l-1)*m); % Tempo medio operazione scaffali

% Twx = Tw/Tt; % Percentuale tempo medio operazione COLLEGATO AL WPT

Twb = Twbx * Tb; % Tempo medio operazione banchina COLLEGATO AL WPT
```

Appendice

```
Tc = Tt + Tb; % Tempo medio complessivo operazione

% Tcw = Tw + Twb; % Tempo medio complessivo operazione COLLEGATO AL WPT

Pm = Pmax* ( Ptraz* ( Tt - To ) + Pmix * ( Tb + To - Twb ) )/Tc; % Consumo energetico istantaneo  
medio

npause = round(Tturno/(Tpausa+Tinter)); % Numero di pause turno

TpausE = npause * Tpausa; % Tempo totale pausa

E = V * Ah * 3600; % Energia totale immagazzinabile  
batteria

nop = round((Tturno-TpausE)/Tc); % Numero di operazioni turno

Eop_acc_din = Pnom * ( Eta_din * Tw + Eta_st * Twb ); % Energia dinamica acquisita  
operazione

Econs = Pm * Tc; % Energia consumata operazione

DeltaE_op = Eop_acc_din - Econs; % Variazione energia operazione

DeltaE_din = DeltaE_op * nop; % Variazione energia turno  
(senza contributo pause)

% DeltaSoc_opx = ( DeltaE_op * nop ) / E * 100; % Variazione SoC turno (senza  
contributo pause)

Eop_acc_stat = Pnom * Eta_st * TpausE; % Energia statica acquisita  
turno

DeltaE = DeltaE_din + Eop_acc_stat; % Variazione energia nel turno

DeltaSoc = DeltaE/E*100; % Variazione SoC nel turno

% save('DeltaSoc','DeltaSoc');

% Numero di Transmitters (Moduli WPT o coppia di bobine)
for i = 1:l;
    for j = 1:m;
        z(i,j) = W(i,j).* max(La(i,j), Lu(i,j));
    end
end

nwpt = ceil(sum(z,'all')/Lwpt)+1; % +1 per conteggiare la stazione di ricarica statica che  
non è parametrizzata
```

```
%% Vincoli

% Numero di discontinuità impianto (salti)

for i = 1:(l-1);
    for j = 1:m;
        Dis(i,j) = abs(W(i,j)-W(i+1,j));
    end
end
Dis;
ndis = sum(Dis,'all');

% Conteggio discontinuità finale

for i=1
    for j=1:m
        if W(i,j) == 1
            ndis = ndis +1;
        end
    end
end
% save('ndis','ndis');

% Numero di discontinuità orizzontali impianto (salti, solo corridoio)

for i = 1
    for j = 1:(m-1);
        DisOriz(1,j) = abs(W(1,j)-W(1,j+1));
    end
end
DisOriz = sum (DisOriz, 'all');

%% Grafici

figure(1)
subplot(4,1,1);
plot(nwpt,DeltaSoc,'bp');
hold on;
title('Numero di bobine WPT installate - Variazione SoC nel turno');
xlabel('Numero di WPT');
ylabel('Delta SoC');
grid on;

figure(1)
subplot(4,1,[3,4]);
heatmap(W, 'Title', 'Posizioni WPT nel Magazzino', ...
        'XLabel', 'Corsie', ...
        'YLabel', 'Celle');
```

Appendice

```
% Inequalities has to be rewritten to ≤ 0 form
c = [      ndis - 10          ;          ... ndis      <= 10      => ndis - 10    <= 0
       - DeltaSoc        ;          ... DeltaSoc   >= 0      => - DeltaSoc  <= 0
       DisOriz           ];          ... DisOriz     <= 0      => DisOriz      <= 0

ceq = [];           % Non ci sono vincoli di uguaglianza      --> Fine funzione!
```