

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Industriale e dell'Informazione

Corso di Laurea Magistrale in
Ingegneria Elettrica



**OTTIMIZZAZIONE ENERGETICA DELLA MARCIA AUTOMATICA
DEI TRENI METROPOLITANI TRAMITE ALGORITMI GENETICI**

Relatore: Prof. Morris Brenna

Tesi di Laurea di:
Dario Castelli
Matr. 800376

Anno Accademico 2013 - 2014

INDICE

INDICE	3
INDICE DELLE FIGURE	7
SOMMARIO	11
INTRODUZIONE	13
RICHIAMI DI TECNICA DEI TRASPORTI E TRAZIONE ELETTRICA	15
1.1 METROPOLITANA LEGGERA E PESANTE	15
1.2 BINARIO E RUOTA FERROVIARIA	17
1.3 CENNI AL MOTO DEI VEICOLI	18
1.3.1 <i>Resistenze al moto</i>	20
1.4 METROPOLITANA SU GOMMA	24
1.5 CARATTERISTICA MECCANICA DEI MEZZI DI TRAZIONE	25
1.6 DIAGRAMMI DI TRAZIONE	28
1.7 FRENATURA ELETTRICA	29
1.7.1 <i>Frenatura a recupero</i>	30
1.8 STAZIONI DI CONVERSIONE	31
1.9 LINEE DI CONTATTO	35
1.9.1 <i>Linea aerea</i>	35
1.9.2 <i>Terza rotaia e Quarta rotaia</i>	37
1.10 TENSIONE DI LINEA	38
1.11 SISTEMA DI SEGNALAMENTO	39
1.12 SCREEN DOORS	41
1.13 PUNTO DI COMANDO E CONTROLLO (PCC)	43
SISTEMI AUTOMATICI DI TRASPORTO	45
2.1 VANTAGGI DELL'AUTOMAZIONE INTEGRALE	45
2.2 AUTOMATIC TRAIN CONTROL (ATC)	46
2.3 AUTOMATIC TRAIN PROTECTION	47
2.3.1 <i>Calcolo SSP</i>	48
2.3.2 <i>Calcolo DSP</i>	50
2.3.3 <i>Misura della velocità</i>	51
2.4 AUTOMATIC TRAIN OPERATION	51
2.4.1 <i>Compiti dell'ATO</i>	52

2.4.2	Struttura del sistema ATO	53
2.5	AUTOMATIC TRAIN SUPERVISION	55
2.6	CENNI SULLE PROCEDURE DI SICUREZZA DELL'ATC	56
ALGORITMI DI OTTIMIZZAZIONE ENERGETICA.....		59
3.1	GUIDA ENERGETICAMENTE EFFICIENTE.....	59
3.2	TECNICA DI OTTIMIZZAZIONE	61
3.2.1	Tabella di controllo marcia d'inerzia	62
3.2.2	Rappresentazione in cromosomi della tabella di controllo	63
3.2.3	Rappresentazione della posizione attraverso i geni	64
3.3	IMPLEMENTAZIONE DELL'ALGORITMO GENETICO	64
3.3.1	Riproduzione, crossover e mutazione	65
3.3.2	Duplicazione e cancellazione dei geni	66
3.3.3	Riordino dei geni nel cromosoma	67
3.4	VALUTAZIONE DELLA FUNZIONE DI FITNESS.....	68
3.4.1	Energia consumata dal treno E	69
3.4.2	Fattore di penalità per i ritardi	69
3.4.3	Fattore di penalità per jerk	71
3.5	STRUTTURA GENERALE DI UN ALGORITMO GENETICO	73
3.6	ELITARISMO	74
3.7	SOPRAVVIVENZA DELL'ALTERNATIVA MIGLIORE	74
3.8	L'OTTIMIZZAZIONE SU LINEE NON AUTOMATIZZATE	75
SVILUPPO DI UNA TECNICA DI OTTIMIZZAZIONE		77
4.1	DESCRIZIONE DELL'ALGORITMO GENETICO	77
4.2	DESCRIZIONE DEL SIMULATORE	78
4.3	FUNZIONE DI FITNESS.....	80
4.4	FATTORE DI PENALITÀ PER I RITARDI	80
4.5	CONTROLLO DI VELOCITÀ E DI FERMATA IN STAZIONE	82
4.6	DESCRIZIONE DEL CASO STUDIO	83
4.6.1	Caratteristiche del treno	83
4.6.2	Caratteristiche del tracciato	85
4.7	CONSUMI ENERGETICI CON GUIDA NON OTTIMIZZATA.....	88
4.8	CONVERGENZA DELL'ALGORITMO	92
4.9	CONSUMI ENERGETICI CON GUIDA OTTIMIZZATA.....	93
4.10	RISPARMIO ENERGETICO E TEMPI DI PERCORRENZA.....	96
4.11	ANDAMENTO DEL FITNESS E DELL'ENERGIA.....	98
CONCLUSIONI.....		105

NOMENCLATURA E LISTA DEGLI ACRONIMI	107
APPENDICE A- CODICE MATLAB.....	109
APPENDICE B- CODICE SIMULINK.....	129
APPENDICE C – ANDAMENTI DI FITNESS E ENERGIA PER LE ALTRE TRATTE.....	135
APPENDICE D – DIAGRAMMI VELOCITÀ TEMPO CASO NON OTTIMIZZATO E EED ALTRE TRATTE.....	155
BIBLIOGRAFIA.....	175

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1.1 Sezione tipica di una rotaia.....	17
Figura 1.2 Ruote ferroviarie	18
Figura 1.3 Forze agenti su un veicolo ferroviario	19
Figura 1.4 Carrello di una metropolitana su gomma.....	24
Figura 1.5 Caratteristica meccanica e andamento della potenza assorbita in funzione della velocità	26
Figura 1.6 Zone di funzionamento e relative forze e velocità.....	28
Figura 1.7 Esempio profilo velocità-tempo	29
Figura 1.8 Stazione di conversione in corrente continua	33
Figura 1.9 Linea di contatto a catenaria	36
Figura 1.10 Sistema a terza e quarta rotaia, metropolitana di Londra	38
Figura 1.11 Sistema di segnalamento semplice.....	40
Figura 1.12 Sistema di segnalamento a blocco mobile	41
Figura 1.13 Porte di banchina metropolitana di Milano (linea M5)	42
Figura 1.14 Postazione operatore del PCC	43
Figura 2.1 Confronto della capacità offerta da una metropolitana convenzionale e una automatica	45
Figura 2.2 Composizione di un sistema ATP	48
Figura 2.3 Processo di calcolo di un SSP generico	49
Figura 2.4 Processo di calcolo di un DSP generico	50
Figura 2.5 Andamento di un SSP e di un DSP	51
Figura 2.6 Struttura di un sistema ATO.....	54
Figura 3.1 Confronto tra una guida non ottimizzata e una ottimizzata.....	61
Figura 3.2 Esempio diagramma velocità distanza corrispondente alla Tabella 3.2	62
Figura 3.3 Esempio di rappresentazione in cromosomi delle relative posizioni.....	63
Figura 3.4 Crossover e mutazione.....	66
Figura 3.5 Duplicazione e cancellazione.....	67
Figura 3.6 Andamento del fattore per i ritardi.....	71
Figura 3.7 Andamento del fattore di penalità per jerk	73

Figura 4.1 Andamento del consumo di energia rispetto al numero di comandi..	78
Figura 4.2 Schema di principio del controllore del simulatore utilizzato	83
Figura 4.3 Caratteristica meccanica del treno preso come esempio	84
Figura 4.4 Andamento della potenza elettrica dei motori in funzione della velocità del treno preso come esempio	85
Figura 4.5 Andamento altimetrico del tracciato	87
Figura 4.6 Profilo velocità tempo tratta R-S non ottimizzato	90
Figura 4.7 Profilo velocità tempo tratta M-N non ottimizzato.....	91
Figura 4.8 Profilo velocità tempo tratta V-W non ottimizzato	92
Figura 4.9 Grafico di convergenza dell'algorithmo genetico	93
Figura 4.10 Profilo velocità tempo tratta R-S con EED.....	95
Figura 4.11 Profilo velocità tempo tratta M-N con EED	95
Figura 4.12 Profilo velocità tempo tratta V-W con EED	96
Figura 4.13 Andamento fitness tratta R-S	99
Figura 4.14 Andamento fitness tratta M-N	100
Figura 4.15 Andamento fitness tratta V-W.....	101
Figura 4. 16 Andamento energia tratta R-S.....	102
Figura 4. 17 Andamento energia tratta M-N	103
Figura 4. 18 Andamento energia tratta V-W	104

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1.1 Caratteristiche del treno MNG (Meneghino) - utilizzato sulle linee 1-2-3 (metropolitana pesante).....	16
Tabella 1.2 Treno LRV automatico - utilizzato sulla linea 5 (metropolitana leggera)	16
Tabella 3.1 Risparmio energetico ottenibile con le diverse metodologie di ottimizzazione	60
Tabella 3.2 Esempio di tabella di controllo marcia d'inerzia	63
Tabella 3.3 Passaggi di un algoritmo di ottimizzazione.....	74
Tabella 4.1 Esempio valori del fattore di penalità.....	81
Tabella 4.2 Caratteristiche del treno del simulatore	84
Tabella 4.3 Lunghezza delle tratte.....	86
Tabella 4.4 Curve del tracciato.....	88
Tabella 4.5 Consumi energetici e tempi di percorrenza con guida non ottimizzata	89
Tabella 4.6 Consumi energetici e tempi di percorrenza guida EED	94
Tabella 4.7 Risparmio energetico percentuale e ritardi percentuali	97

SOMMARIO

Dopo aver richiamato i concetti base del trasporto ferroviario e della trazione elettrica, soffermandoci principalmente sulle metropolitane automatiche ed i sistemi ad essa collegati (ATC, ATP, ATO), si presenta una tecnica di ottimizzazione energetica della guida del treno attraverso il controllo della marcia di inerzia con l'utilizzo degli algoritmi genetici. Gli algoritmi genetici sono un procedimento euristico iterativo e di ricerca stocastica utilizzato in informatica per trovare soluzioni esatte o approssimate a problemi di ottimizzazione. Ne verrà sviluppata e simulata una versione con l'utilizzo di MATLAB per verificare le potenzialità del metodo. La tecnica di ottimizzazione prevede l'ottimizzazione del movimento del treno mediante l'utilizzo di una tabella di controllo della marcia d'inerzia creata mediante l'utilizzo di un algoritmo genetico che minimizza il consumo energetico e rispetta le condizioni di tempo di viaggio imposte. Questa tabella impone i punti lungo la tratta dove iniziare la marcia d'inerzia, la trazione o la frenatura. I risultati ottenuti, sebbene preliminari, suggeriscono che il metodo è promettente.

Parole chiave: Algoritmo genetico, ATC, ATO, marcia d'inerzia, metropolitana automatica, ottimizzazione energetica.

ABSTRACT

After an introduction on the basic concepts of rail and electric traction, focusing mainly on automatic subway and the systems connected to it (ATC, ATP, ATO), a technique for energy optimization of the train movement through coast control using genetic algorithms. Genetic algorithms are a heuristic search and iterative stochastic method used in computing to find exact or approximate solutions to optimization problems. It will be developed and simulated a version with the use of MATLAB to verify the potential of the method. The optimization technique provides the optimization of the train's movement through a coast control table created by the use of a genetic algorithm that minimizes the energy consumption and the train scheduled time. This table set points along the route where starting coasting, traction or braking. The obtained results, although preliminary, suggest that the method is promising.

Key word: Genetic algorithm, ATC, ATO, coasting march, automatic subway, energy optimization.

Introduzione

L'efficienza energetica è uno degli obiettivi principali per tutte le amministrazioni ferroviarie sia sul piano economico, sia sul piano ambientale. La guida energeticamente efficiente (EED) è riconosciuto come una delle aree migliori dove investire per diminuire i consumi energetici di una linea. L'applicazione di una guida energeticamente efficiente permette risparmi sostanziali senza dover ricorrere ad ingenti investimenti infrastrutturali.

Una delle tecniche più promettenti per raggiungere una guida energeticamente efficiente è quella basata sull'utilizzo degli algoritmi genetici, i quali simulano i processi di selezione naturale, dell'adattamento all'ambiente circostante e dell'evoluzione darwiniana degli esseri viventi.

Il controllo della marcia d'inerzia prevede la creazione di tabelle di controllo dove vengono visualizzati i comandi (trazione, marcia d'inerzia e frenatura) da impartire al treno e della posizione lungo il tracciato dove questi verranno eseguiti. Queste tabelle di controllo sono trasformate in stringhe di bit, dette cromosomi, a cui si applicano processi tipici della selezione naturale e della genetica per trovare la soluzione migliore in termini energetici e di comfort dei passeggeri.

Esistono anche altre tecniche per il calcolo di profili di velocità energeticamente efficienti, ma gli algoritmi genetici offrono la migliore performance, arrivando ad un risparmio anche del 40% rispetto alla guida non ottimizzata.

Dopo un'introduzione con i richiami di tecnica dei trasporti e trazione elettrica necessari per sviluppare l'argomento e una panoramica sui sistemi automatici di trasporto, con particolare riferimento a quanto riguarda i sistemi utilizzati nelle metropolitane automatiche, quali l'Automatic Train Control e i suoi sottosistemi (Automatic Train Operation, Automatic Train Protection e Automatic Train Supervision), si presenta la tecnica di ottimizzazione derivata dalla letteratura internazionale, utilizzata per spiegare passo-passo il funzionamento degli algoritmi genetici nei processi di ottimizzazione energetica in ambito ferroviario.

Infine viene sviluppata una semplice tecnica di ottimizzazione basata sugli algoritmi genetici e ne vengono testate le prestazioni su un esempio di linea metropolitana, simulata al computer con l'ausilio di Matlab e di Simulink.

Capitolo 1

Richiami di tecnica dei trasporti e trazione elettrica

1.1 Metropolitana leggera e pesante

La norma UNI 8379 [1] definisce come metropolitana “un sistema di trasporto rapido di massa, di alta capacità e frequenza costituito da veicoli automotori o mossi da veicoli automotori circolanti su rotaia, oppure con altra guida vincolante e completamente svincolata da qualsiasi altro tipo di traffico, con regime di circolazione regolata da segnali”. Questa definizione rispecchia molto bene il concetto di metropolitana pesante. Inoltre la norma associa anche la definizione di metropolitana leggera, quale “sistema di trasporto rapido di massa che mantiene le caratteristiche della metropolitana, ad eccezione della portata oraria, che è prevista minore, e dei veicoli che, qualora opportunamente attrezzati possono essere utilizzati su tratti di linea che, avendo caratteristiche tramviarie, non rientrino nella categoria delle metropolitane leggere”.

Tipicamente i veicoli utilizzati nelle metropolitane tradizionali o pesanti, hanno una sagoma ed una lunghezza maggiore di quelli di una metropolitana leggera.

A titolo di esempio riportiamo i dati di due tipi di veicoli utilizzati nella metropolitana di Milano [2].

Tabella 1.1 Caratteristiche del treno MNG (Meneghino) - utilizzato sulle linee 1-2-3 (metropolitana pesante)

Configurazione unità di trazione (UdT)	R+M+M
Configurazione treno	2 UdT
Altezza	3,65 m
Lunghezza UdT	52,75 m
Larghezza	2,15 m
Peso massimo per asse	12,5 t
Tensione	1500/750 V dc
Potenza continuativa UdT	1280 kW
Velocità massima	90 km/h
Trazione	IGBT
Posti seduti UdT	102
Posti totali UdT	628
Numeri porte per fiancata	12

Tabella 1.2 Treno LRV automatico - utilizzato sulla linea 5 (metropolitana leggera)

Composizione treno	4 casse, articolato
Altezza	3,7 m
Lunghezza	50,5 m
Larghezza	2,65 m
Tensione	750 V dc
Potenza continuativa	1024 kW
Velocità massima	80 km/h
Trazione	IGBT
Posti seduti	96
Posti totali	536
Numero porte per fiancata	8

1.2 Binario e ruota ferroviaria

Un binario è costituito da due rotaie appoggiate e ancorate su traverse, le quali possono essere di legno trattato, cemento oppure acciaio, a loro volta appoggiate su massicciate di pietrisco oppure su piattaforme di cemento provviste di elementi atti a limitare la trasmissione delle vibrazioni.

Per le rotaie esistono una serie di profili unificati caratterizzati dalla massa per unità di lunghezza, tipicamente per le metropolitane si ha una massa lineica di 50-60 kg/m. La sezione tipica di una rotaia è riportata in figura 1.1.

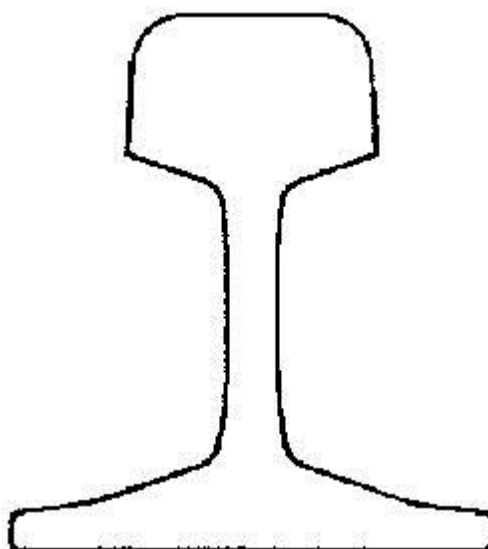


Figura 1.1 Sezione tipica di una rotaia

Il binario è costituito da spezzoni di rotaia di lunghezza che varia tra 36-48 m collegati tramite giunti che consentono lo scorrimento per dilatazione termica, oppure direttamente saldate in opera dove siano adottati dei miglioramenti nel sistema di ancoraggio e l'escursione termica sia ridotta, come ad esempio nelle gallerie.

L'eliminazione dei giunti migliora la qualità di marcia dei veicoli, aumentando il benessere dei viaggiatori. In trazione elettrica il binario è normalmente utilizzato come conduttore negativo e poiché i giunti danno luogo ad una resistenza elettrica supplementare è evidente il vantaggio dell'eliminazione dei giunti o quantomeno alla riduzione del numero.

La distanza tra le due facce del fungo delle rotaie è chiamata scartamento, il cui valore normale è di 1435 mm utilizzato nel 60% delle reti ferroviarie nel mondo.

Le ruote dei veicoli ferroviari hanno un cerchione di acciaio che si appoggia sulla superficie superiore del fungo della rotaia ed è provvisto di bordino di guida. Le ruote normalmente sono di tipo rigido, costituite da un cerchione calettato su un mozzo d'acciaio oppure monoblocco. Due ruote ed un assile costituiscono la classica sala ferroviaria, rappresentata in figura 1.2. La sala è guidata automaticamente dai bordini delle ruote: questo sistema è molto efficace e consente la formazione di convogli, anche di notevole lunghezza, trainati o spinti.

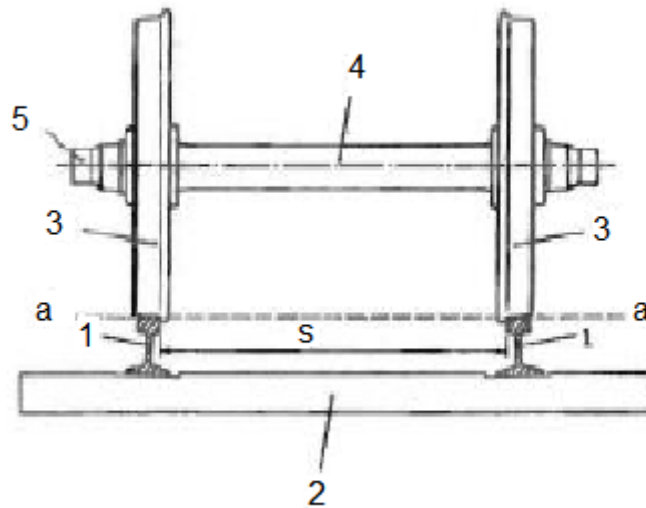


Figura 1.2 Ruote ferroviarie

Legenda: 1) rotaie; 2) traversa ;3) ruote; 4) assile; 5) fusello; a-a piano del ferro; s scartamento

1.3 Cenni al moto dei veicoli

Nello studio delle caratteristiche del moto dei veicoli entrano in considerazione le seguenti forze:

- forze attive F , aventi direzione del vettore velocità v ;

- forze passive o resistenti R , aventi direzione del vettore v e verso opposto;
- forze d'inerzia.

Le forze attive possono a loro volta avere il verso del vettore v se sono motrici (forze di trazione), oppure verso opposto, se sono resistenti (forze frenanti).

Si considera per semplicità il veicolo o il complesso di veicoli come un punto materiale, avente la massa m del veicolo; indicando allora con F la risultante di tutte le forze attive di trazione, con R la risultante di tutte quelle passive e supposte nulle le forze frenanti, l'equazione del moto, se rettilineo risulta:

$$F - R = m_e \cdot a \quad (1.1)$$

dove a è l'accelerazione, positiva se diretta come v , e m_e la massa equivalente del veicolo, che tiene conto, oltre della massa reale m , dell'effetto dovuto alle parti rotanti.

Nel caso in cui il veicolo sia in fase di frenatura, agisce su di esso, oltre alla R , la forza frenante B ; riterremo anche in questo caso valida per semplicità l'equazione precedente, e considereremo la B come forza attiva negativa, ponendo $-B$ al posto di F . L'accelerazione di frenatura, detta anche decelerazione, sarà anch'essa negativa e data dalla formula (1.2):

$$a = - \frac{B+R}{m_e} \quad (1.2)$$

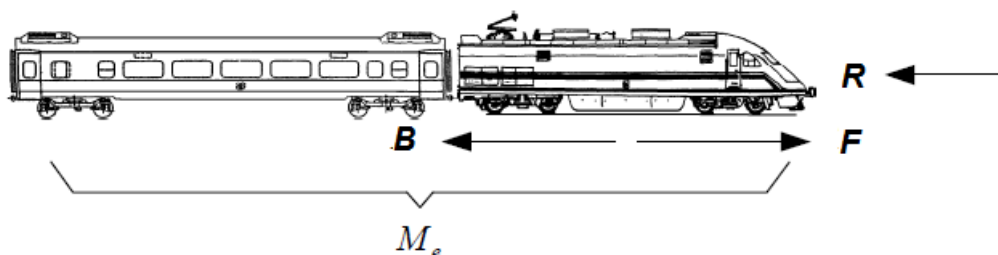


Figura 1.3 Forze agenti su un veicolo ferroviario

1.3.1 Resistenze al moto

La resistenza al moto R si può considerare come somma della resistenza all'avanzamento in rettilineo e orizzontale R_0 e della resistenza dovuta alle accidentalità del tracciato R_e

$$R = R_0 + R_e \quad (1.3)$$

La R_0 comprende:

- la resistenza al rotolamento R_1 , dovuta alla coppia perno-cuscinetto (R_1') e alla coppia ruota terreno (R_1'').
- la resistenza dell'aria R_2

$$R_0 = R_1' + R_1'' + R_2 \quad (1.4)$$

A sua volta la R_e è data dalla somma della resistenza dovuta alla pendenza (R_i) e dalla resistenza dovuta alle curve (R_c).

$$R_e = R_i + R_c \quad (1.5)$$

Oltre alle forze resistenti R , si considerano spesso le resistenze unitarie riferite all'unità di peso:

$$r = \frac{R}{G} \quad (1.6)$$

nel caso in cui le R siano proporzionali al peso G del veicolo.

Nel valutare la resistenza R_0 all'avanzamento in piano e rettilineo si ricorre di solito a formule empiriche che danno per i diversi tipi di veicoli, il valore di R_0 in funzione della velocità. Con espressioni del tipo:

$$R_0 = a + b \cdot v + c \cdot v^2 \quad (1.7)$$

oppure

$$R_0 = a + c \cdot v^2 \quad (1.8)$$

dove a, b, c sono grandezze opportunamente scelte. In funzione della natura dei veicoli e dei convogli.

Come precedentemente detto, spesso si preferisce utilizzare per ragioni di semplicità la resistenza unitaria.

Ad esempio, per un treno viaggiatori moderno si può assumere (V in km/h):

$$r_0(N/kN) = (1,25 \div 2) + (0,016 \div 0,025) \cdot \left(\frac{V}{10}\right)^2 \quad (1.9)$$

invece per materiale rotabile leggero quale tram o metropolitane, a sagoma non aerodinamica, date le limitate velocità di marcia, si può usare l'espressione (sempre V in km/h):

$$r_0(N/kN) = (2,5 \div 3) + 0,04 \cdot \left(\frac{V}{10}\right)^2 \quad (1.10)$$

Da tener conto durante il calcolo di R_0 è la presenza di gallerie lungo il tracciato, visto che in questi tratti la resistenza dell'aria R_2 cresce in misura notevole: approssimativamente raddoppia, con le sezioni di galleria normalmente adottate.

La resistenza dovuta alla pendenza R_i è data dalla componente del peso G parallela al piano inclinato che si sta percorrendo:

$$R_i = G \cdot \sin(\alpha) \quad (1.11)$$

utilizzando le relazioni trigonometriche si può scrivere:

$$R_i = G \cdot \frac{\tan(\alpha)}{\sqrt{1+\tan^2(\alpha)}} \quad (1.12)$$

Considerando la pendenza della via $i = \tan\alpha$, si ha:

$$R_i = \frac{i \cdot G}{\sqrt{1+i^2}} \quad (1.13)$$

Per ferrovie ad aderenza naturale la pendenza arriva al massimo al 25-35 ‰; in tal caso l'angolo α risulta tanto piccolo da potersi porre:

$$R_i \approx G \cdot \tan \alpha \quad (1.14)$$

cioè

$$R_i = i \cdot G \quad (1.15)$$

$$r_i = i \quad (1.16)$$

Pendenze più elevate sono realizzabili nella trazione stradale e nelle ferrovie ad aderenza artificiale; in tal caso è necessario utilizzare l'espressione completa.

La resistenza dovuta alle curve R_c dipende, nei veicoli ferroviari, da diversi fattori; in primo luogo dal parallelismo fra le sale, a causa del quale le ruote non hanno un moto di puro rotolamento. Gli strisciamenti che si originano fra ruota e rotaia danno luogo a un lavoro perduto per attrito, quindi a una forza resistente.

Poiché inoltre le due ruote di una sala sono tra di loro solidali, mentre il veicolo percorre una curva, si hanno strisciamenti a causa della differenza tra il percorso che deve compiere la ruota esterna e quello della ruota interna. La conicità con la quale sono costruiti i cerchioni dovrebbe compensare, entro certi limiti, la differenza di percorso, grazie al gioco esistente tra bordino e rotaia; la sala si dispone infatti in modo che la ruota esterna abbia un diametro di rotolamento maggiore rispetto a quella interna. In realtà gli strisciamenti dovuti al calettamento rigido delle ruote sulla sala si manifestano in ogni caso.

Sono infine da considerare le forze trasversali che la superficie laterale del fungo della rotaia esercita sul bordino delle ruote, mediante le quali il veicolo viene guidato in curva; nel contatto si hanno strisciamenti che danno luogo ad una forza resistente.

Le diverse cause citate sopra danno una forza resistente R_C e la corrispondente resistenza unitaria r_c , ma la valutazione di queste per via teorica non è facile, per cui si fa riferimento a formule sperimentali.

Per esempio riportiamo la formula di Von Röckl (1.17):

$$r_c = \frac{a}{(\rho - b)} \quad (1.17)$$

con ρ il raggio della curva e i termini a e b che assumono i seguenti valori per scartamento normale:

$a=0,65\text{m}$,

$b=55\text{m}$ per ρ maggiore di 350m ,

$b=65\text{m}$ per ρ compreso tra 250 e 350m .

Oppure si può utilizzare una formula più semplice in base alle esigenze (1.18):

$$r_c = \frac{0,8}{\rho} \quad (1.18)$$

Se possibile utilizzare le espressioni semplificate, la resistenza complessiva al moto si può esprimere come somma di termini tutti proporzionali al peso G del veicolo, considerando la resistenza unitaria complessiva variabile con la velocità v :

$$R = r(v) \cdot G \quad (1.19)$$

$$r(v) = r_0(v) \pm i + r_c \quad (1.20)$$

Con $r_0(v)$ come calcolato sopra con le formule (1.9) o (1.10), i la pendenza della linea (positiva o negativa in base se siamo in salita o in discesa), r_c la resistenza unitaria dovuta alle curve.

In caso in cui non sia possibile utilizzare le formule semplificate si rimanda alla letteratura specifica per un approccio più rigoroso.

1.4 Metropolitana su gomma

La metropolitana su gomma è una forma di trasporto ferroviario che utilizza alcune tecnologie tipiche del trasporto stradale. Le vetture hanno ruote con pneumatici di gomma che corrono su rotaie di calcestruzzo o acciaio. Come nelle normali ferrovie il macchinista non deve manovrare le ruote, guidate dai binari attraverso opportune ruote di guida. La corrente di trazione è fornita da un sistema a terza e quarta rotaia laterale.

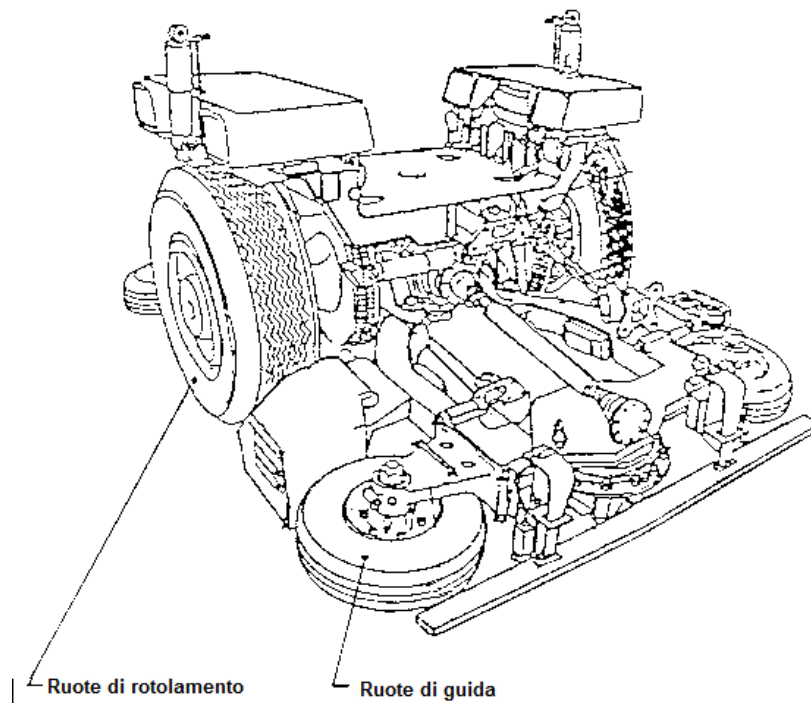


Figura 1.4 Carrello di una metropolitana su gomma

La metropolitana su gomma può contare in una maggiore accelerazione e un minor spazio di frenatura, oltre alla capacità di salire o scendere da tracciati più inclinati grazie alla migliore aderenza del pneumatico rispetto alle ruote in ferro. Di contro troviamo diversi svantaggi, infatti le ruote di gomma frizionano maggiormente contro il binario rispetto a quelle in acciaio, il che porta ad un consumo più elevato di energia.

Inoltre i veicoli perdono rapidamente la capacità di trazione se sottoposti a condizioni climatiche avverse, specialmente neve e ghiaccio, e questo è il motivo per cui molte reti sono costruite interamente sottoterra. Un altro svantaggio è il calore sprigionato dagli pneumatici sottoposti a notevoli frizioni coi binari, imponendo l'istallazione nei tunnel di impianti di ventilazione. Anche il costo di manutenzione gioca a sfavore: le gomme si consumano molto più velocemente e necessitano di essere cambiate più spesso; anche se un paio di ruote di acciaio è più costoso di un paio di gomme, la frequenza delle sostituzioni rende comunque più economica la ruota d'acciaio.

1.5 Caratteristica meccanica dei mezzi di trazione

La forza attiva F che un asse motore sviluppa per effetto della sua coppia motrice, viene trasmessa tangenzialmente al terreno attraverso l'area di impronta chiamata forza di trazione al cerchione.

La curva che restituisce la forza di trazione totale ai cerchioni in funzione della velocità di marcia costituisce la caratteristica meccanica del mezzo di trazione. Un esempio qualitativo è riportato in figura 1.5:

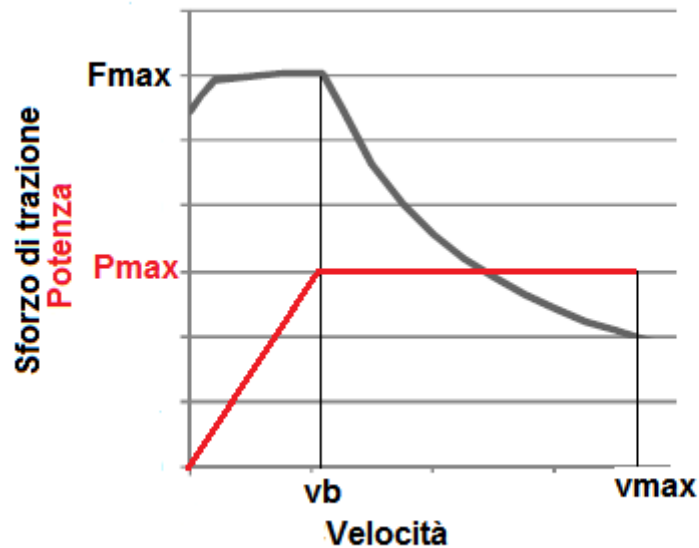


Figura 1.5 Caratteristica meccanica e andamento della potenza assorbita in funzione della velocità

La potenza meccanica sviluppata, cioè la potenza ai cerchioni è data da

$$P_c = F \cdot v \quad (1.21)$$

Una caratteristica importante di un mezzo di trazione è la sua elasticità di funzionamento esprimibile con il rapporto (1.22):

$$\beta = \frac{v_{max}}{v_b} \quad (1.22)$$

fra la velocità massima di marcia v_{max} e la velocità minima v_b , detta velocità di base, alla quale è possibile utilizzare la potenza nominale.

Per valori di velocità minori della velocità base v_b si mantiene lo sforzo di trazione costante all'aumentare della velocità, ottenuto mediante un opportuna regolazione dell'azionamento elettrico ad un valore compatibile con il limite di ade-

renza tra le ruote e il binario, con i valori massimi di coppia che i motori di trazione possono sviluppare e in modo da sviluppare un'accelerazione sopportabile dai passeggeri. Questa fase è chiamata a coppia costante o a forza costante, ed è fondamentale nei veicoli a cui sono richieste frequenti accelerazioni e decelerazioni, dove si sfrutta al meglio la forza massima disponibile e quindi la massima accelerazione.

Giunti al punto a velocità base v_b , i motori stanno erogando la loro potenza massima. Per raggiungere valori maggiori di velocità è necessario ridurre il valore dello sforzo di trazione, in modo da mantenere costante il valore della potenza, sino a raggiungere la velocità massima ammissibile v_{max} . Questa fase è detta a potenza costante.

Nei veicoli mossi da motori elettrici è facile invertire il senso di marcia. L'azionamento è intrinsecamente bidirezionale e sviluppa caratteristiche meccaniche perfettamente simmetriche rispetto all'origine degli assi v e F .

Poiché i motori elettrici sono anche reversibili, è inoltre possibile realizzare la frenatura elettrica a condizione che i circuiti di potenza assumano le opportune configurazioni. Il passaggio, per un determinato senso di marcia, dalla trazione alla frenatura elettrica corrisponde all'inversione del segno della forza F . Le caratteristiche meccaniche di un azionamento così costituito occupano quindi tutti e quattro i quadranti del piano v - F come indicato in figura 1.6

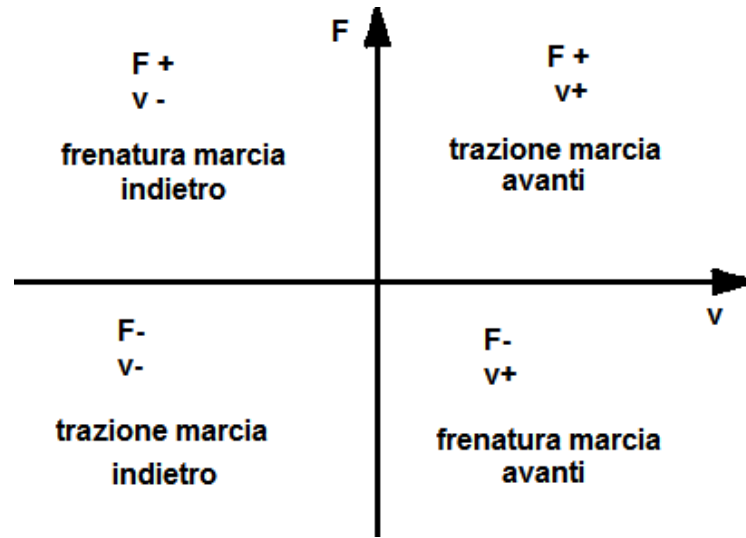


Figura 1.6 Zone di funzionamento e relative forze e velocità

1.6 Diagrammi di trazione

I diagrammi di trazione sono molto utilizzati nelle operazioni ferroviarie e in ambito di ricerca, come nel calcolo delle performance di un treno, stima del tempo di viaggio, valutazione del consumo di energia, programmazione di una nuova tratta o nel miglioramento di una vecchia.

I diagrammi di trazione sono grafici a due dimensioni che mostrano la relazione velocità-distanza, velocità-tempo e tempo-distanza durante il viaggio di un treno utili per analizzare le dinamiche che si presentano.

Esempio di profilo velocità-tempo:

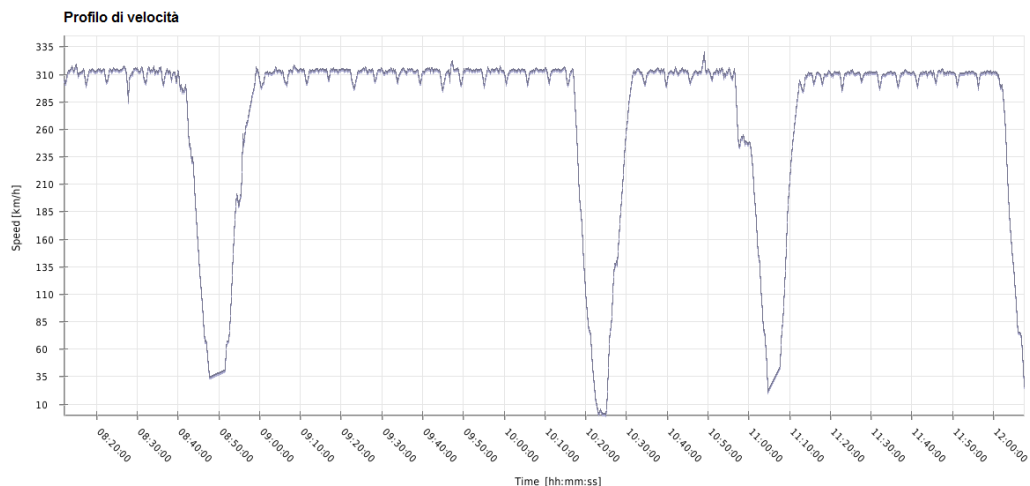


Figura 1.7 Esempio profilo velocità-tempo

1.7 Frenatura elettrica

Nei veicoli a trazione elettrica è possibile utilizzare i motori di trazione, oltre che nelle fasi di avviamento e marcia, anche in frenatura.

La frenatura elettrica consente di limitare in servizio normale l'impiego dei sistemi frenanti ad attrito che, per loro natura, comportano notevoli costi per la manutenzione e la sostituzione delle parti soggette ad usura.

Essa risolve in modo tecnicamente vantaggioso il problema della frenatura di tenuta in discesa e della frenatura di arresto.

L'utilizzazione dei motori elettrici in frenatura costituisce una soluzione particolarmente favorevole sia nelle linee urbane e suburbane, caratterizzate dalla brevità delle singole tratte e dagli elevati valori delle decelerazioni, sia nei trasporti ferroviari ad alta velocità, in quanto l'impiego dei freni ad attrito diventa critico oltre i 160-180 km/h.

In frenatura i motori di trazione vengono opportunamente configurati in modo tale da poter funzionare come generatori e assorbire potenza meccanica dall'albero. Ogni motore assorbe una potenza meccanica pari a

$$P_a = \eta_i \cdot P_f \quad (1.23)$$

con η_i il rendimento degli ingranaggi di trasmissione e P_f la potenza frenante ai cerchioni

$$P_f = B \cdot v \quad (1.24)$$

dove B è la forza frenante e v la velocità di marcia.

Il motore funzionante da generatore eroga la potenza elettrica ai morsetti:

$$P = V \cdot I = \eta \cdot P_a = \eta \cdot \eta_i \cdot B \cdot v = \eta_t \cdot B \cdot v \quad (1.25)$$

dove $\eta_t = \eta \cdot \eta_i$ rappresenta il rendimento totale del motore e degli ingranaggi.

La potenza P può essere:

- Dissipata a bordo del veicolo per effetto Joule in un reostato di frenatura (frenatura reostatica).
- Restituita alla linea di contatto, purché questa sia in grado di riceverla (frenatura a recupero).

1.7.1 Frenatura a recupero

Per effettuare la frenatura a recupero è necessario innanzitutto che i motori, funzionanti da generatori, siano posti in condizione di trasferire la potenza elettrica prodotta alla linea di contatto. A tale scopo il circuito di trazione deve assumere un'ideale configurazione. Se, in particolare, esso comprende convertitori elettronici, questi debbono essere per loro natura reversibili, oppure opportunamente commutati.

La seconda condizione da soddisfare è che la potenza venga assorbita da un carico, cioè:

-Un altro convoglio che percorra la medesima linea sia in fase di assorbimento di corrente

-Dalle sottostazioni prossime se nell'istante considerato non vi siano in linea carichi. A tal fine occorre che le sottostazioni siano reversibili, in modo che la potenza di frenatura possa essere trasferita alla rete trifase di alta tensione.

Se nessuna delle condizioni sopra citate viene soddisfatta, la frenatura elettrica a recupero non può aver luogo: in tal caso deve intervenire istantaneamente la frenatura reostatica se prevista, oppure la frenatura meccanica.

Si tenga presente che durante la frenatura di arresto, una volta messa in funzione la frenatura meccanica, questa non può più essere interrotta, anche se le condizioni per il recupero si ripristinassero; ciò a causa dei tempi d'intervento relativamente lunghi del sistema meccanico.

Le sottostazioni reversibili sono molto costose, e inoltre le caratteristiche di erogazione della potenza recuperata non sono favorevoli per la rete trifase industriale. Si tratta infatti di brevi punte di potenza, con forte contenuto armonico e fattore di potenza basso. Per conseguenza il recupero è condizionato dalla possibilità di utilizzare direttamente in linea la potenza di frenatura: esso diventa significativo nelle linee urbane e suburbane a traffico molto intenso, dove il numero di convogli presenti ed in fase di assorbimento è statisticamente più elevato, particolarmente vero nelle ore di punta. Sebbene una parte consistente dell'energia restituita venga dissipata per effetto Joule nel circuito di linea, nelle metropolitane si possono raggiungere riduzioni dei consumi di energia dell'ordine del 20-30%. Nei trasporti urbani che si sviluppano prevalentemente in galleria la frenatura a recupero aggiunge il vantaggio dell'eliminazione della forte produzione di calore nelle fasi di frenatura, che richiede un'efficace ventilazione delle stazioni sotterranee e delle gallerie, con un non trascurabile assorbimento di potenza.

1.8 Stazioni di conversione

Nei trasporti pubblici urbani si impiega di regola la trazione a corrente continua a bassa tensione con valori tipici di 600 V o 750 V e in qualche caso a 1500 V,

Le sottostazioni sono collegate tra loro attraverso linee primarie in alta tensione appositamente costruite oppure direttamente alla rete trifase industriale di distribuzione in media o alta tensione,

Nel caso delle metropolitane, sviluppandosi in un territorio di limitate dimensioni dove le stazioni delle reti industriali sono numerose e di potenza sufficientemente elevata, l'estensione delle linee primarie è ridotta, e le sottostazioni sono alimentate ad una tensione non superiore di 20-30 kV.

La distanza media tra le sottostazioni è molto limitata, per esempio in una metropolitana a 750 V a forte traffico può essere dell'ordine di 1,3 -1,5 km.

Uno schema tipico di principio di una sottostazione è riportato in figura 1.8, la quale si riferisce al caso di una ferrovia elettrificata con filo di contatto aereo oppure con terza rotaia e ritorno attraverso il binario.

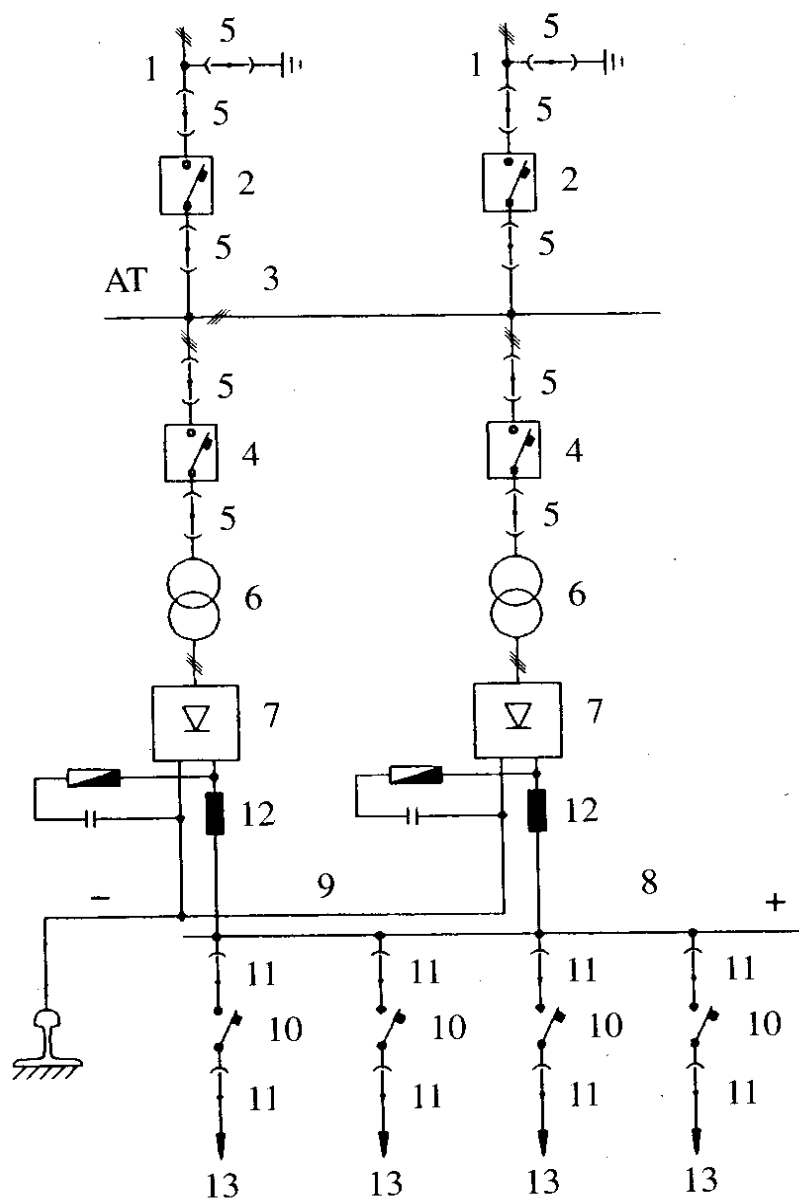


Figura 1.8 Stazione di conversione in corrente continua

Legenda:

- 1) linee primarie trifasi AT; 2) interruttori tripolari di linea; 3) sbarre trifasi AT;
- 4) interruttori tripolari di gruppo; 5) sezionatori tripolari; 6) trasformatori trifasi;
- 7) raddrizzatori; 8) sbarra c.c. positiva; 9) sbarra c.c. negativa; 10) interruttori extrarapidi; 11) sezionatori c.c.; 12) filtri; 13) alimentazione linea di contatto.

La sottostazione comprende:

- Linee primarie trifasi AT in arrivo;
- Sbarre trifasi AT;
- I gruppi di conversione, protetti singolarmente da interruttori tripolari AT di gruppo;
- Sbarre in corrente continua delle quali, nel caso considerato, quella negativa è collegata alle rotaie di corsa;
- Alimentatori positivi, che collegano la sbarra positiva alla linea di contatto;

A loro volta i gruppi di conversione sono costituiti da

- Un trasformatore trifase, che ha il compito di abbassare la tensione in relazione al valore della tensione continua;
- Un raddrizzatore costituito da diodi al silicio collegati a ponte trifase. A volte può essere conveniente suddividere il raddrizzatore in due ponti trifasi; in tal caso il trasformatore ha due avvolgimenti secondari, uno per ciascun ponte.

Gli alimentatori positivi sono protetti da interruttori extrarapidi, che intervengono in caso di corto circuiti in linea.

Le sottostazioni che alimentano linee con terza e quarta rotaia entrambe isolate hanno alimentatori positivi e negativi e sia i sezionatori che gli interruttori di linea possono essere isolati.

La sottostazione è formata, in sostanza, da una sezione ad alta tensione, comprendente le linee primarie, le sbarre trifasi AT, gli interruttori ed i sezionatori tripolari dei gruppi di conversione, i trasformatori, e da una sezione in corrente continua formata dai raddrizzatori, dagli extrarapidi e dai sezionatori c.c.

La sezione AT è di norma installata all'aperto e può assumere una consistenza considerevole, quando la sottostazione, ubicata in un nodo importante, adempie le funzioni di stazione di smistamento fra più primarie o anche di trasformazione, se le primarie sono a tensioni differenti. La sezione a corrente continua è spesso installata in un edificio, insieme ai quadri di controllo e comando, fatta eccezione dei sezionatori delle linee a c.c. uscenti (alimentatori).

Ciascuna amministrazione ferroviaria cerca di standardizzare, nei limiti del possibile, gli impianti ed il macchinario delle sottostazioni. L'unificazione riguarda in primo luogo il valore della tensione delle linee primarie, che condiziona le caratteristiche delle linee stesse, delle apparecchiature AT e dei trasformatori. I gruppi di conversione sono anch'essi standardizzati. Le esigenze di continuità di esercizio richiedono almeno due gruppi per sottostazione; nei nodi ferroviari più importanti si possono avere SSE con tre o più gruppi. In qualche caso si ammettono SSE con un solo gruppo, senza assicurare la continuità dell'alimentazione c.c.

1.9 Linee di contatto

Nelle metropolitane la captazione della corrente di trazione viene effettuata principalmente con due metodologie: linea aerea e terza rotaia (il sistema a quarta rotaia può essere visto come una variante di quest'ultimo).

1.9.1 Linea aerea

La linea aerea è costituita da un filo, con il quale viene a contatto la presa di corrente dei veicoli, e dagli elementi di sospensione.

Normalmente la linea è costituita da due fili in parallelo di rame trafilato, opportunamente sagomati per consentire l'attacco dei morsetti di sospensione, ciascuno della sezione di 100-150 mm².

Il problema fondamentale è ottenere una captazione regolare di corrente, attraverso un contatto che, dal punto di vista elettrico, non è certamente perfetto. In pratica la velocità relativa tra l'organo di presa e il filo consente un funzionamento soddisfacente, a condizione che le pressioni esercitate dalla presa e le caratteristiche elastiche di quest'ultima siano appropriate.

Le locomotive assorbono correnti fino a 2000-3000 A e anche maggiori, a seconda della loro potenza e del valore della tensione di alimentazione. Per garantire una corretta captazione è bene non superare assorbimenti di 2000 A per pantografo; per correnti maggiori, occorrono due pantografi in presa.

Il sistema più semplice di sospensione della linea di contatto è quello trasversale, impiegato normalmente nelle linee tranviarie e filoviarie. I fili di contatto, sempre singoli, sono sostenuti in corrispondenza dei punti di sospensione mediante fili

ausiliari trasversali, provvisti di isolatori e ancorati a pali oppure agli edifici circostanti. Il sistema è molto semplice ed economico; il suo inconveniente fondamentale è rappresentato dalla disuniforme elasticità del filo. Nei punti di sospensione si possono avere distacchi della presa e urti; le interruzioni di corrente provocano scintillio, perlinatura del filo e sua usura anormale. Viene normalmente adottato per linee urbane di superficie, dato le modeste velocità di marcia e la possibilità di avere campate abbastanza corte, senza aggravamenti sensibili d'impianto.

Il sistema di sospensione più frequentemente utilizzato nelle ferrovie è invece quello longitudinale, che prevede una fune sostenuta da pali o appesa al soffitto delle gallerie tramite appositi organi isolanti, la quale sostiene il filo di contatto mediante pendini, situati a distanza ridotta e si dispone secondo una catenaria con freccia massima dell'ordine di 1 m; il sistema è anche detto a catenaria. La lunghezza dei pendini è calcolata in modo che il filo o i fili di contatto risultino orizzontali; questi sono collegati in parallelo con la corda portante e fra di loro mediante cavallotti flessibili in rame

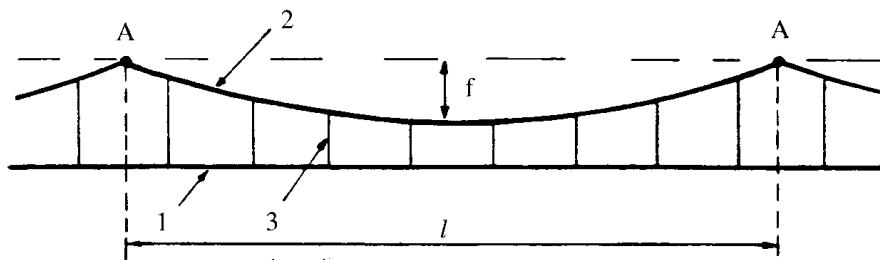


Figura 1.9 Linea di contatto a catenaria

Legenda: Filo di contatto; 2) Fune portante; 3) pendini; l campata; f freccia.

Per consentire un consumo uniforme degli striscianti delle prese di corrente, il filo di contatto è disposto a zig-zag rispetto alla mezzzeria del binario.

Può a volte essere necessario aumentare la sezione della linea, soprattutto nei tratti a forte traffico, per limitare le densità di corrente o le cadute di tensione.

Si aggiungono perciò in parallelo alla linea dei conduttori supplementari denominati alimentatori o feeders, posati in prossimità della linea di contatto vera e propria e collegati in parallelo ad essa.

Il circuito di ritorno è rappresentato dai binari.

1.9.2 Terza rotaia e Quarta rotaia

La terza rotaia è situata lateralmente rispetto al binario con la superficie di contatto orizzontale posta ad una certa altezza rispetto al piano delle rotaie, nella versione più semplice è appoggiata su isolatori con la superficie di contatto rivolta verso l'alto. Una versione più sicura della terza rotaia prevede la superficie di contatto rivolta verso il basso e l'isolamento delle altre facce della rotaia. Esiste inoltre una terza soluzione intermedia a superficie di contatto verticale.

Questo sistema viene utilizzato soprattutto nelle metropolitane, perché consente di costruire gallerie più basse e nel caso di metropolitane sopraelevate di aver un minor impatto visivo, inoltre, essendo il tracciato quasi completamente inaccessibile, si riducono i rischi di contatti accidentali alla rotaia in tensione, cosa che non sarebbe facile garantire nei tracciati ferroviari.

Il circuito di ritorno è di solito rappresentato dai binari come nel sistema a linea aerea.

Nel caso si utilizzi una quarta rotaia isolata di ritorno come conduttore negativo questa è praticamente uguale alla terza rotaia con contatto superiore. Questo particolare sistema è utilizzato solo nella metropolitana di Londra e nella linea 1 della metropolitana di Milano.

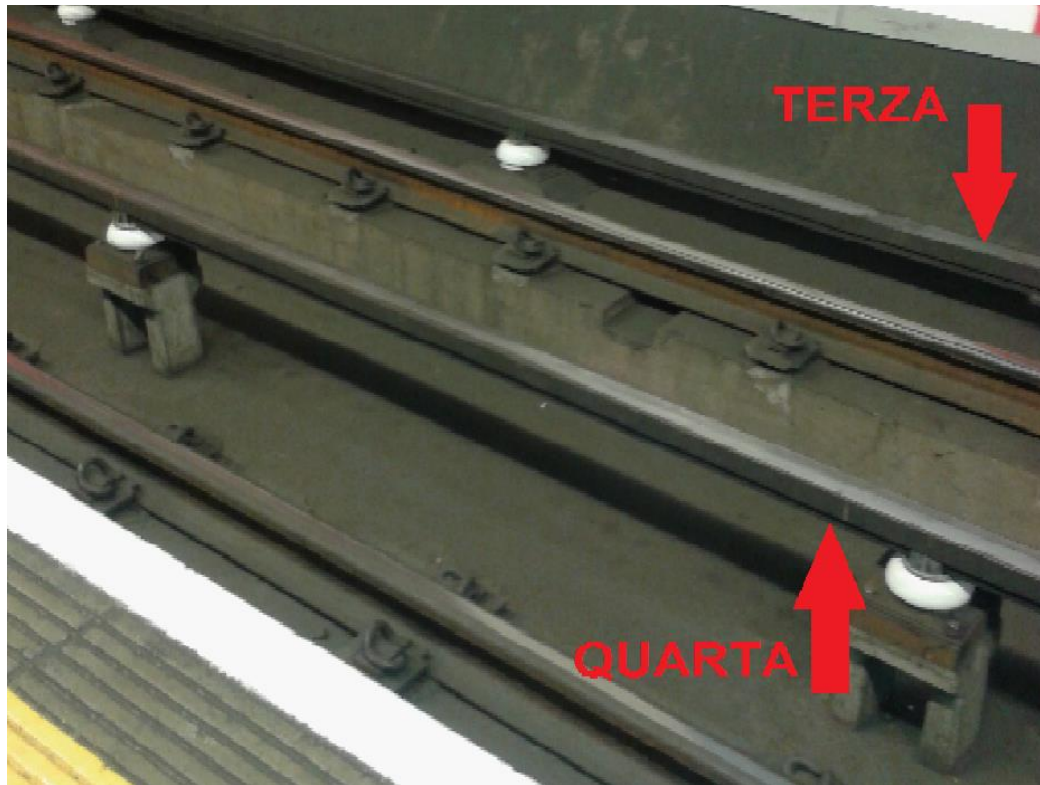


Figura 1.10 Sistema a terza e quarta rotaia, metropolitana di Londra

1.10 Tensione di linea

Nei sistemi a corrente continua, con tensioni nominali di 750-1500-3000 volt, la norma CEI EN 50163 ammette notevoli variazioni permanenti della tensione, pari a -33% e +20% rispetto ai valori nominali. La norma indica inoltre i valori massimi sostenibili per tempi minori di cinque minuti ancora più elevati, precisamente:

- Nelle reti a 750 V fino a 950 V (+27%), elevabile fino a 1000 V (+33%) in presenza di frenatura a recupero;
- Nei sistemi a 1500 V e 3000 V tensioni massime non permanenti di 1950 V e 3900 V (+30%);

1.11 Sistema di segnalamento

Solitamente un treno non è in grado di fermarsi in distanze tali che il conducente possa assicurarsi che il percorso sia libero da ostacoli, e a differenza dei veicoli stradali non può cambiare direzione per evitarli. Inoltre il basso coefficiente di aderenza ruota binario e le grandi masse in gioco aumentano considerevolmente la distanza di arresto.

Viene quindi ad essere necessario l'utilizzo di un sistema che avverta il conducente della possibilità di avanzare o meno lungo il binario.

Un sistema di segnalamento efficace è necessario quando si utilizzano sistemi a guida automatica, dove il computer di bordo deve sempre essere aggiornato sulla propria posizione e velocità e la posizione e velocità degli altri treni circolanti.

I principali compiti di un sistema di segnalamento moderno sono:

- Prevenire la collisione dei treni;
- Prevenire il deragliamento se gli scambi non sono settati in maniera corretta;
- Dare un'autorizzazione a procedere che non sia in conflitto con il percorso impostato;
- Proteggere i passaggi a livello;
- Fare un uso ottimale del servizio ferroviario;
- Dare indicazioni sulla massima velocità da tenere relativa alla geometria del binario
- Individuare e prevenire danneggiamenti del binario
- Rilevare e segnalare gli ingressi abusivi sul tracciato
- Proteggere gli addetti ai lavori

Il sistema di segnalamento più semplice consiste nello spezzare il binario in tronconi elettricamente isolati tra di loro e installare un trasmettitore all'inizio e un ricevitore alla fine. Il trasmettitore invia un segnale di corrente sul binario, se il troncone di binario è libero da treni il ricevitore capta il segnale e dà il via libera all'ingresso nella tratta di sua competenza. Quando un treno si trova all'interno, le ruote metalliche cortocircuitano le due rotaie e il ricevitore non rileva più il segnale, bloccando l'accesso al troncone occupato.

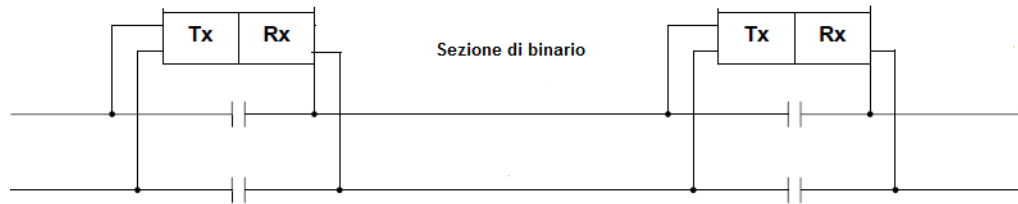


Figura 1.11 Sistema di segnalamento semplice

Il sistema di segnalamento più utilizzato nelle metropolitane moderne si basa sul concetto di “blocco mobile” e l'utilizzo di una comunicazione continua attraverso segnali radio.

Nei sistemi basati sul blocco fisso (come nell'esempio precedente), le sezioni di binario tra due punti fissati non potevano essere occupate da più di un treno contemporaneamente. Attraverso il monitoraggio continuo della posizione e velocità del treno e la comunicazione di questa attraverso segnali radio al centro di controllo è possibile definire un blocco mobile dove ogni treno ha l'autorizzazione a procedere. Questo blocco mobile si sposta assieme al treno garantendo le distanze di sicurezza tra i veicoli, permettendo agli stessi di muoversi più vicini tra di loro ottenendo prestazioni più spinte nell'intera linea, con un tempo di attesa tra un treno e l'altro di circa 80-90 secondi, contro i 3-4 minuti di un sistema con blocco fisso.

Questo sistema è utilizzato nei sistemi a guida automatica dove la posizione e la velocità devono essere costantemente controllate e la comunicazione continua con il posto centrale deve essere sempre garantita.

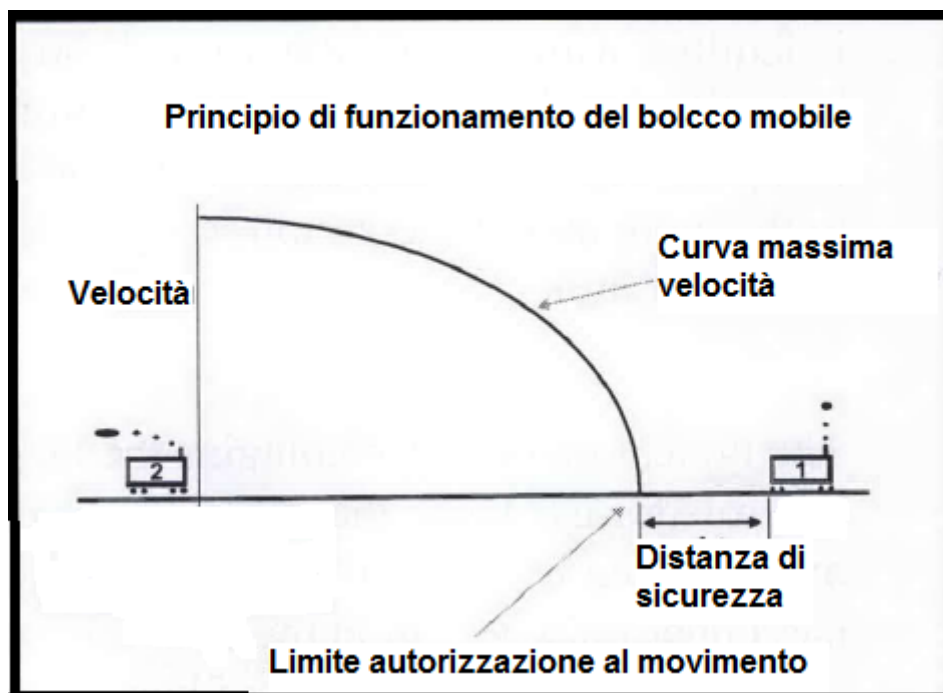


Figura 1.12 Sistema di segnalamento a blocco mobile

1.12 Screen doors

Le Platform Screen Doors o porte di banchina sono installate ad entrambi i lati della banchina per isolarla dai binari. Le porte impediscono ai passeggeri l'accesso ai binari e alle gallerie, prevenendo cadute accidentali o tentativi di suicidio. Inoltre se le porte chiudono completamente la banchina fino al soffitto possono ridurre il rumore e far risparmiare sul riscaldamento e sul condizionamento delle stazioni.

Il sistema è costituito da quattro tipi di porte:

- Porte fisse: dislocate sul bordo della banchina, queste porte sono fisse e stazionarie.
- Porte scorrevoli automatiche: sono composte da due porte scorrevoli, una per ogni porta del treno. Esse si apriranno assieme a quelle del treno permettendo la salita e la discesa dei passeggeri e una volta chiuse impediscono l'accesso ai binari.
- Porte di emergenza: possono essere aperte manualmente in condizioni di emergenza

- Porte di fine banchina: dislocate alla fine della banchina, solitamente chiuse possono essere controllate manualmente se necessario.

Le porte possono funzionare in tre diverse modalità: totalmente automatica, semiautomatica e manuale.

Durante il normale servizio le porte funzionano in modalità automatica, totalmente controllate dal sistema automatico.

In caso di emergenza l'operatore dal centro di controllo o dallo scomparto di controllo stazione può passare in modalità semiautomatica e dare il comando di apertura porte (Per esempio per far scaricare i fumi di un incendio in stazione nelle gallerie).

Il controllo manuale permette di aprire le porte grazie ad una chiave oppure di isolare una porta difettosa dall'intero sistema. L'apertura manuale può inoltre essere attivata dai passeggeri dal lato treno in caso ci siano malfunzionamenti.



Figura 1.13 Porte di banchina metropolitana di Milano (linea M5)

1.13 Punto di comando e controllo (PCC)

Il PCC è il cuore di tutto il sistema automatico, dove sono presenti gli operatori che supervisionano il funzionamento della linea automatica.

Ogni operatore può configurare il proprio terminale in modo da selezionare e controllare un certo tratto di linea.

Nel centro di controllo sono presenti postazioni specifiche per alcuni particolari servizi quali:

- Il controllore di linea, il quale prende le decisioni strategiche di servizio della linea
- Il servizio informazioni, che mantiene i viaggiatori informati sullo stato della linea
- La postazione di manutenzione, dove viene mostrata la diagnostica di tutti i componenti del sistema.

Sono inoltre presenti video che consentono la telesorveglianza delle stazioni.



Figura 1.14 Postazione operatore del PCC

Capitolo 2

Sistemi automatici di trasporto

2.1 Vantaggi dell'automazione integrale

L'introduzione dell'automazione integrale in una metropolitana porta ad una serie di vantaggi tecnico-economici non indifferenti come viene spiegato in [5]. Per prima cosa si può adattare facilmente l'offerta di trasporto alla domanda in base al programma di fornitura del servizio potendo inserire e ritirare in tutta autonomia i treni dall'esercizio.

Nella figura 2.1 è riportato un grafico che confronta la capacità offerta da una metro convenzionale ed un sistema VAL (veicolo automatico leggero).

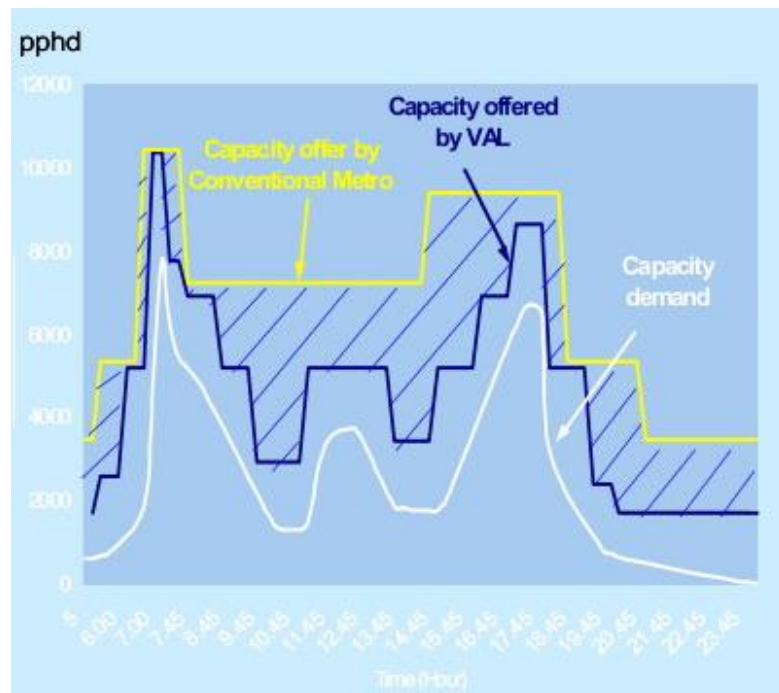


Figura 2.1 Confronto della capacità offerta da una metropolitana convenzionale e una automatica

L'assenza del personale di guida permette di aumentare la frequenza dei treni in qualsiasi momento senza dover avere una riserva di macchinisti sempre pronta. Inoltre è possibile estendere l'orario di esercizio senza problemi. Si ottengono poi tempi di attesa ridotti per gli utenti ed un conseguente incremento della velocità commerciale della linea.

Inoltre abbiamo anche altri benefici indotti dalla maggior flessibilità dell'esercizio quale una migliore occupazione dei posti offerti evitando treni sovraffollati, un uso ottimale del materiale rotabile che evita l'utilizzo di treni non necessari, un possibile miglioramento dei servizi informativi dedicati agli utenti e la semplificazione della gestione dei depositi, che vengono gestiti automaticamente del sistema. Tutto questo induce ad un beneficio anche per le aziende di trasporto pubblico, che riescono a fornire gli stessi servizi con un reddito maggiore.

L'automazione perciò permette un servizio efficace ed attraente in ogni momento della giornata, anche in occasione di eventi straordinari quando il flusso di passeggeri aumenta rispetto alle ordinarie condizioni di esercizio.

Grazie alla maggior frequenza dei treni, è possibile utilizzare treni più piccoli e leggeri rispetto alle metropolitane classiche, mantenendo comunque la stessa capacità di traffico. La scelta di treni più piccoli permette di ridurre la lunghezza delle stazioni e le dimensioni delle infrastrutture consentendo un inserimento più semplice nel tessuto urbano di una nuova linea automatica e riducendo considerevolmente l'investimento iniziale. Inoltre il miglioramento della qualità del servizio grazie ad un aumento della puntualità e della disponibilità dei treni favorisce l'utilizzo della metropolitana da parte dei viaggiatori incrementando le entrate derivanti dall'esercizio.

2.2 Automatic Train Control (ATC)

L'Automatic Train Control (ATC) è il sistema che controlla automaticamente il movimento dei treni, il rispetto delle norme di sicurezza e dirige le operazioni ferroviarie. L'ATC include l'ATP (Automatic Train Protection) e può includere l'ATO (Automatic train operation) e/o l'ATS (Automatic train supervision), in base al grado di automazione della linea.

ATP: L'Automatic train protection è il sottosistema con cui l'ATC impone e controlla i limiti di velocità massima, previene la collisione tra i treni e protegge da altre condizioni pericolose attraverso la rilevazione della posizione, la separazione dei treni e l'utilizzo di interblocchi

ATO: L'Automatic train operation è il sistema che svolge le funzioni di regolazione della velocità, arresto programmato del treno, controllo delle porte, regolazione del livello di prestazione del treno e altre operazioni altrimenti assegnate al macchinista.

ATS: L'Automatic train supervision è il sottosistema con cui l'ATC monitora i treni e aggiusta le loro prestazioni in modo da rispettare gli orari della tabella di marcia, e fornisce i dati necessari a aggiustare il servizio per minimizzare gli inconvenienti causati da irregolarità nel servizio.

2.3 Automatic Train Protection

Il sistema è composto da una struttura fissa e una a bordo di ciascun veicolo. L'ATP a bordo riporta la posizione del proprio veicolo alla parte fissa periodicamente. L'ATP a margine del binario fornisce l'autorizzazione al movimento ad ogni treno, e il profilo statico di velocità (static speed profile SSP) calcolato in base allo stato (permanente o temporaneo) del binario e ai limiti di velocità imposti. Con queste informazioni il sistema di bordo crea a sua volta il profilo dinamico di velocità (dynamic speed profile DSP) che pone il limite di velocità massimo in funzione della posizione del treno, calcolando la curva di frenatura del proprio treno. Con il profilo dinamico l'ATP protegge il treno dalle collisioni con gli altri rotabili presenti sulla linea. Il sistema ATP viene sempre progettato in modo da garantire una sicurezza intrinseca dei passeggeri (Fail-safe).

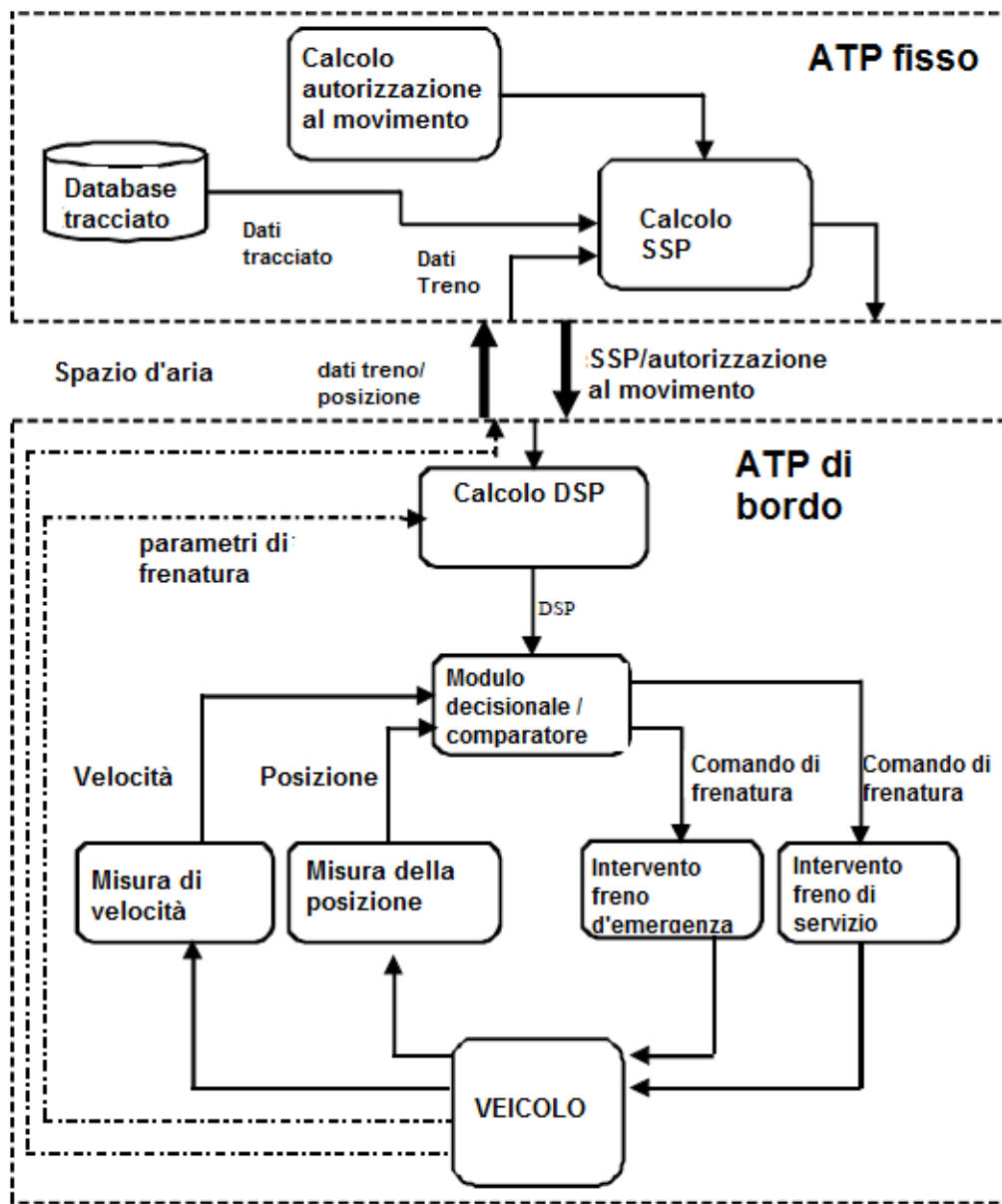


Figura 2.2 Composizione di un sistema ATP

2.3.1 Calcolo SSP

Il profilo statico di velocità è una funzione a gradini, in relazione alla velocità e alla posizione del treno. Per calcolarlo L'ATP a terra considera varie limitazioni

statiche di velocità, limiti di protezione circolazione, limiti permanenti o temporanei di velocità delle infrastrutture, limiti permanenti o temporanei di velocità dei treni, e restrizioni di velocità temporanee dall'ATS.

Il calcolo dell'SSP è la selezione del limite più restrittivo tra i quelli considerati. Se in una sezione il profilo statico diminuisce, la velocità effettiva del treno deve essere ridotta a quel valore prima di passare il punto di confine tra le due velocità limite.

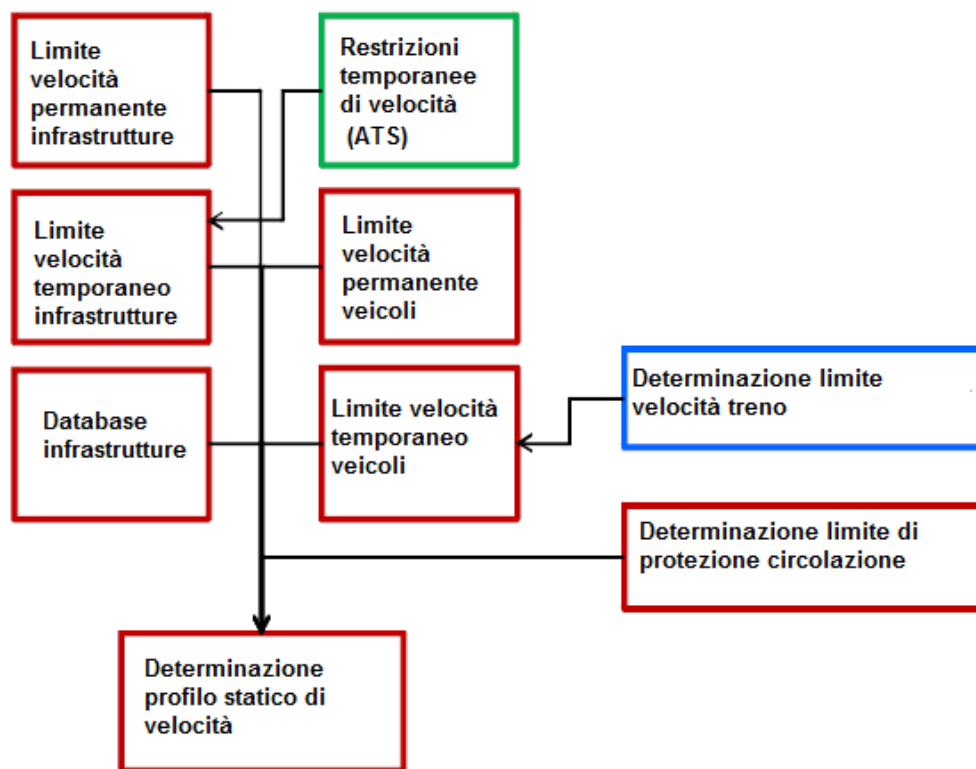


Figura 2.3 Processo di calcolo di un SSP generico

Il profilo statico di velocità è calcolato dal ATP fisso, e trasmesso al sistema di bordo attraverso il dispositivo di comunicazione binario-treno.

2.3.2 Calcolo DSP

Il profilo dinamico di velocità rappresenta l'incremento o il decremento della velocità del treno, basato sull'SSP. Viene calcolato a bordo a partire dal profilo statico e dal limite di autorizzazione al movimento ricevuto dal ATP fisso.

Il DSP così calcolato è utilizzato per determinare la velocità massima a cui può viaggiare il treno e del profilo di guida che l'ATO deve mantenere.

Per calcolare il profilo dinamico è necessario disporre del modello in frenatura del treno.

Durante il cambiamento di velocità limite da una più alta ad una più bassa la testa del treno deve rispettare il DSP; invece se il cambiamento avviene tra una velocità più bassa e una più alta l'estremità posteriore del treno dovrà rispettare l'SSP.

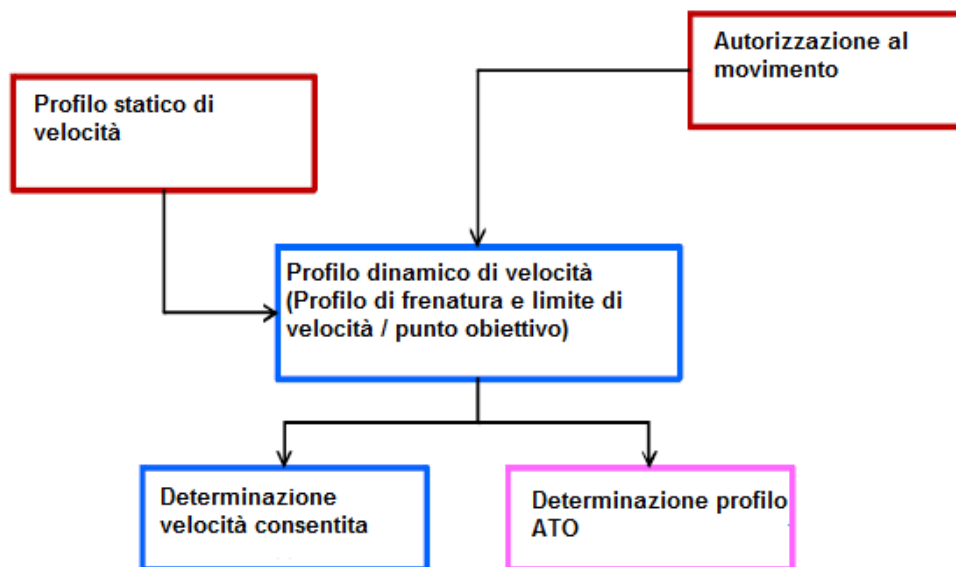


Figura 2.4 Processo di calcolo di un DSP generico

In figura 2.5 riportiamo un esempio qualitativo di come si presenta un DSP e un SSP:

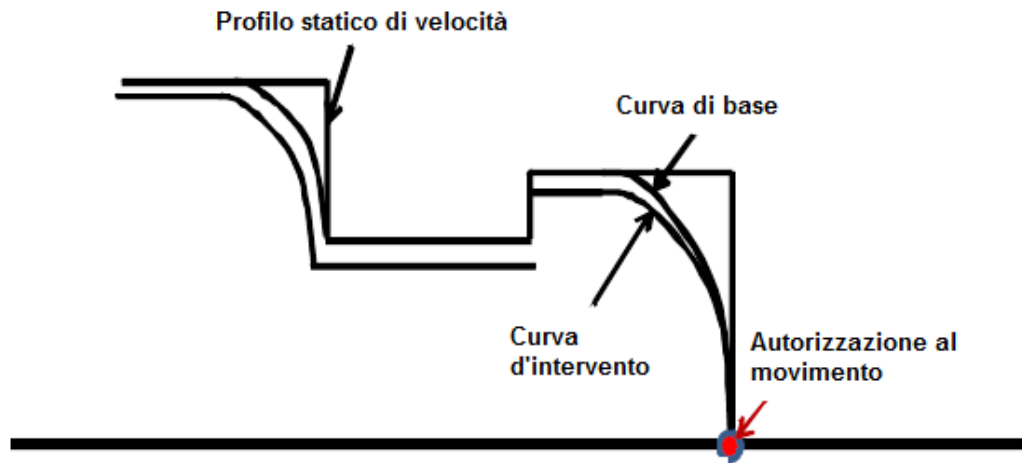


Figura 2.5 Andamento di un SSP e di un DSP

2.3.3 Misura della velocità

Particolare attenzione si deve prestare alla determinazione della velocità, visto che è una funzione critica e vitale del sottosistema ATP. Dalla corretta valutazione di questa grandezza è possibile applicare nel modo più preciso possibile i dispositivi per la sicurezza della marcia del treno. La velocità del veicolo è determinata virtualmente usando due sensori di velocità, i cui output sono impulsi. L'ATP a bordo del veicolo converte questi impulsi in distanza lineare usando la misura del diametro della ruota. La velocità del veicolo è quindi calcolata in millimetri per ciclo (mmpc) contando gli impulsi per unità di tempo. L'ATP è fornito di una funzione per la compensazione dovuta all'usura della ruota permettendo una misura accurata della velocità e della distanza percorsa.

2.4 Automatic Train Operation

La funzione principale del sistema ATO è quello di raggiungere autonomamente un'elevata qualità di guida in circostanze normali, ed è responsabile della maggior

parte delle fasi di avvio del treno, di trazione, di marcia inerziale e di controllo della frenatura.

In generale la velocità del treno viene aggiustata, nell'intervallo ammissibile, in modo da minimizzare il passaggio tra le fasi di trazione, marcia per inerzia e frenatura.

Un buon sistema ATO deve essere progettato con un'alta tolleranza rispetto ai guasti (Fault-tolerance).

L'ATO è costituito da diversi sottosistemi che gestiscono autonomamente una determinata azione, come vedremo dopo nella descrizione della struttura.

2.4.1 Compiti dell'ATO

Controllo dell'avvio: quando il sistema riceve il comando di partenza dalla centrale di controllo, vengono chiuse le porte e viene controllato il loro stato. Il comando di rilascio dei freni meccanici è inviato all'unità controllo freni (Brake Control Unit BCU), e il comando di trazione viene mandato all'inverter.

Guida automatica tra le stazioni: questa è la funzione più importante del sistema ATO, che può generare i segnali di controllo di trazione e frenatura per regolare la velocità del treno in accordo con la curva velocità- distanza di arresto. Questa curva è calcolata automaticamente dall'ATO basandosi sui limiti imposti dall'ATP, dalla distanza tra le stazioni e il tempo di percorrenza in modo da mantenere la marcia del treno più efficace, confortevole ed energeticamente efficiente.

Puntualità: durante la marcia del treno, esso è controllato dal ATO rispettando i tempi di percorrenza. Per rispettare la tabella di marcia, il sistema automatico può modificare la velocità di crociera, sempre rispettando i limiti del ATP, in modo da mantenere in linea di massima i tempi di percorrenza previsti.

Arresto del treno: la distanza dal punto di arrivo è rilevata attraverso apparecchi riceventi sul veicolo per permettere al treno di fermarsi nella corretta posizione sulla banchina, per esempio in corrispondenza delle porte di banchina (Screen doors). La modalità di arresto è richiamata attraverso la ricezione da parte dell'ATO delle informazioni di posizionamento attraverso le apposite balise. Inoltre sono previste spire induttive di posizionamento per migliorare la precisione

dell'operazione. Il sistema ATO deve far arrestare il treno accuratamente nel punto prescritto più dolcemente possibile. Poi il sistema ATP permetterà all'ATO di aprire le porte solo se l'errore di posizione tra quella effettiva e quella prescritta è al di sotto di una certa soglia.

Controllo delle porte: l'apertura delle porte può essere comandata solo quando specifiche condizioni sono verificate, quali l'interblocco dell'apertura tra porte di destra e di sinistra o l'obbligo di apertura solo a treno fermo.

Controllo di altri dispositivi: l'ATO è anche responsabile del controllo delle luci, dell'aria condizionata, dell'impianto di diffusione voce, tergilicci, clacson e ventilazione delle carrozze.

Registrazione delle operazioni: le informazioni più importanti riguardanti la marcia vengono salvate in un'apposita memoria, e possono essere richiamate dagli operatori autorizzati per condurre le necessarie analisi in caso di funzionamento anormale.

Cambio della modalità di guida: in caso in cui sia prevista anche la guida manuale del treno in sostituzione a quella automatica, questa può essere inserita seguendo una procedura specifica rispettando certe condizioni di sicurezza. Il sistema ATP continuerà comunque a supervisionare la guida e accerterà il rispetto dei limiti di sicurezza.

2.4.2 Struttura del sistema ATO

Il sistema ATO è costituito da diverse unità appositamente progettate per svolgere un singolo compito:

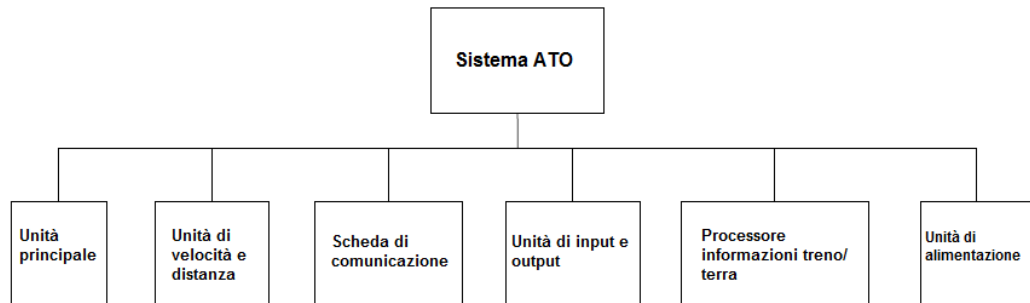


Figura 2.6 Struttura di un sistema ATO

Unità principale: quest'unità è il cuore principale del sistema ATO, che combina ed elabora le informazioni ricevute e comanda le unità di input e output e di controllo.

La funzioni dell'unità principale sono:

1. Calcolare la curva operativa di movimento in accordo con i limiti imposti dall'ATC e con i parametri del modello del treno.
2. Calcolare la velocità e durata della marcia per inerzia
3. Dare istruzioni al treno in base ai risultati ottenuti
4. Verificare l'effettivo stato delle grandezze in uscita
5. Inviare le informazioni alle apparecchiature di terra

Unità di velocità e distanza: la funzione principale è quella di misurare la velocità e calcolare la distanza percorsa, del tutto simile a quanto avviene nel sistema ATP. Inoltre deve raccogliere il segnale di sincronizzazione mandato dall'ATP di terra e di bordo, e di compararlo con il valore della distanza calcolata e della velocità misurata. Il valore della velocità viene poi mandato all'unità principale dopo il controllo. Questo segnale di sincronismo è usato principalmente per una calibrazione della distanza calcolata.

Scheda di comunicazione: la scheda di comunicazione è utilizzata per la comunicazione ad alta velocità tra l'ATO e l'ATP o tra l'ATO e l'unità di comunicazione di bordo.

Unità di input e output: è responsabile dell'interfaccia tra l'ATO e il treno. La sezione di output include l'uscita analogica e l'uscita digitale. La sezione di input include gli ingressi provenienti dagli altri sistemi e la rilettura delle uscite dell'ATO

Processore informazioni treno terra: serve a comunicare i dati identificativi (come il numero del treno, la destinazione ecc) tra l'ATO e il sistema ATS di terra e viceversa.

Unità di alimentazione: è responsabile di provvedere all'alimentazione di ogni unità. La potenza in ingresso è presa di solito dal sistema a 110V DC del treno, con possibilità di essere alimentata a batterie. Le uscite di potenza devono essere separate e non avere un punto di terra comune per evitare interferenze tra esse.

2.5 Automatic Train Supervision

Il compito principale dell'ATS è quello di gestire l'intera linea, ottimizzando il numero di treni e modificare la loro marcia in modo di minimizzare i ritardi. Le decisioni prese dall'ATP devono comunque essere validate dall'ATC, in modo da mettere la sicurezza sempre al primo posto.

Il sistema ATS traccia automaticamente la posizione, il tipo e la tabella di marcia di tutti i treni in servizio, e visualizzati nell'apposito interfaccia utente.

Un sistema ATS di solito include anche una funzione di dispacciamento dei treni automatico, basato sulla posizione attuale e l'avanzamento dei treni, sulla tabella di marcia e le strategie di servizio implementate dagli operatori.

L'ATS inoltre può inibire o forzare alcune azioni intraprese solitamente dall'ATO, come trattenere un treno alla fermata per più tempo, saltare una stazione oppure fermare un treno in corsa.

Il sistema ha anche il compito di gestire il servizio informativo al pubblico, tramite messaggi vocali registrati o attraverso schermi posti sui treni o nelle banchine.

L'ATS costituisce l'anello di congiunzione, o "interfaccia", tra gli operatori del Punto di Comando e Controllo (PCC) e l'intero sistema di automazione della metropolitana.

A tal fine consente al personale del PCC di verificare in continuo su apposita strumentazione lo stato del sistema e, se richiesto, attivare le operazioni necessarie a mantenere o ripristinare l'efficienza del servizio. Come l'ATO, anche l'ATS resta completamente subordinato all'ATP affinché nessuna decisione comprometta la sicurezza dei passeggeri.

2.6 Cenni sulle procedure di sicurezza dell'ATC

Vediamo ora una panoramica sulle procedure di sicurezza del sistema ATC per garantire un corretto svolgimento della marcia dei treni nel caso in cui una delle attività dei sottosistemi ATP, ATO o ATS si trovi in una condizione di criticità o in una situazione non prevista dal sistema.

Perdita del segnale di velocità: fondamentale in un sistema di trazione automatica è la conoscenza della velocità di avanzamento, per questo motivo essa viene misurata da due tachimetri indipendenti.

Nel caso in cui si si abbia la perdita di segnale a causa di un guasto in un singolo tachimetro, questo sarà rilevato come una condizione di pattinamento e il sistema ATP fermerà il treno. Quando l'ATP di bordo permetterà all'ATO di dare propulsione, visto che la situazione si ripresenta, il veicolo fallirà il controllo del sensore di movimento ed azionerà la fermata di emergenza non recuperabile. Anche nel caso in cui abbiamo la perdita di entrambi i segnali, il sottosistema ATP reagisce nella stessa maniera non potendo distinguere le due condizioni di malfunzionamento.

Procedure di frenatura di emergenza: il sistema è progettato per minimizzare per quanto possibile l'eventualità che l'ATP richieda una frenatura di emergenza e blocchi il veicolo lungo la linea. Gli eventi che scatenano la frenatura di emergenza sono:

- Perdita di segnale in cabina
- Le velocità di linea e di traguardo vanno a zero
- Valori non raggiungibili di distanza dal traguardo
- Guasto del sottosistema ATO
- Errore di direzione

Sicurezza della frenatura: il sottosistema ATP controlla il tasso di decelerazione dopo che è stato applicato il comando di frenatura dall'ATO. Se entro uno specificato periodo di tempo il comando di frenatura non raggiunge il minimo tasso di decelerazione atteso verrà azionato il freno di emergenza.

A seconda della gravità dell'evento ci sono tre tipi di fermate di emergenza: fermate di emergenza revocabili, fermate di emergenza non recuperabili, fermate di emergenza irrevocabili.

Stazionamento del veicolo per la fermata in stazione: Alla fermata in stazione il veicolo deve essere correttamente allineato con la banchina e le porte di banchina, prima di poter aprire le sue porte per la discesa e la salita dei passeggeri. Questa operazione di allineamento, detta stazionamento, deve essere assicurata dal sistema di segnalamento di terra. Tutto ciò deve verificarsi prima che la richiesta di apertura porte di banchina sia inviata al sistema di terra. Il requisito vitale di accuratezza dello stazionamento per consentire l'apertura delle porte è di più o meno 1,1 metri dal punto stabilito, per consentire ai passeggeri il passaggio attraverso un'apertura libera. L'ATP di bordo riceve l'indicazione del corretto stazionamento da due fonti separate.

Superamento della banchina: quando il veicolo supera la posizione ottimale di stazionamento in banchina l'ATP non permette all'ATO di aprire le porte e invia un messaggio all'ATO informandolo del fatto. Anche se l'ATO è a conoscenza del superamento della banchina le sue azioni correttive sono limitate, poiché normalmente non si prevede che un veicolo retroceda. In questo caso l'ATP permette l'arretramento del veicolo, che si muove contro la direzione del traffico, per un massimo di due metri. Se il treno si trova oltre la distanza massima, l'ATO cancella la fermata e continuerà la corsa fino alla stazione successiva.

Push-recovery: in caso in cui un treno si fermi lungo la linea e non sia possibile farlo ripartire è possibile attuare la funzione di Push-Recovery automatica che consente al treno successivo di avvicinarsi in tutta sicurezza al treno guasto e di spingerlo alla stazione successiva, dove i passeggeri verranno fatti scendere dal veicolo guasto.

Eventi di pericolo: In caso di individuazione di un evento di pericolo, il sistema reagisce con 3 diversi livelli di intervento in funzione del grado di pericolosità:

1° livello: arresto d'emergenza di un treno;

2° livello: arresto d'emergenza di tutti i treni all'interno della stessa sezione;

3° livello: arresto d'emergenza di tutti i treni all'interno della stessa sezione e di quelle adiacenti, sospensione erogazione energia.

Capitolo 3

Algoritmi di ottimizzazione energetica

3.1 Guida energeticamente efficiente

Il principale obiettivo di una guida energeticamente efficiente (EED energy efficient driving) è quello di far viaggiare un treno da A a B utilizzando la minor energia possibile. Il profilo di velocità che ne deriva deve essere programmato considerando le caratteristiche del binario (pendenze, limiti di velocità, etc.), le caratteristiche del treno (tara, carico, massima accelerazione, efficienza dei componenti, etc.) e vincoli operativi (in particolare la durata del viaggio).

Essenzialmente esistono tre tecniche matematiche di ottimizzazione per ottenere i migliori profili di velocità:

- Programmazione non lineare: un sistema di equazioni e disequazioni chiamati vincoli, è risolto su un set di variabili sconosciute reali, con una funzione obiettivo da massimizzare o minimizzare, dove alcuni dei vincoli o la funzione obiettivo sono non lineari. Nel nostro caso la funzione obiettivo è l'energia consumata dal treno, che è una funzione non lineare della velocità
- Logica Fuzzy: è una forma di logica multivalore derivata dalla teoria degli insiemi fuzzy per affrontare con un ragionamento approssimato (vale a dire "parzialmente vero o falso ") un problema, piuttosto che con una logica di vero o falso, come nella logica booleana.
- Algoritmi genetici: è un procedimento euristico iterativo (cioè procedere per tentativi ed errori) e di ricerca stocastica (cioè non-deterministico). Questa tecnica viene utilizzata in informatica per trovare soluzioni esatte o approssimate a problemi di ottimizzazione.

La tabella 3.1 mostra un confronto dell'energia risparmiata rispetto alla guida non ottimizzata (quella che prevede di portarsi sempre alla massima velocità e di de-

celerare il più tardi possibile, la quale comporta i tempi di viaggio minori) di algoritmi di guida ottenuti con le tre tecniche di ottimizzazione a parità di tempo impiegato nel percorrere la tratta (maggiorato del 10% rispetto alla guida non ottimizzata), come riportato in [10].

Tabella 3.1 Risparmio energetico ottenibile con le diverse metodologie di ottimizzazione

Tecnica di ottimizzazione	Energia risparmiata con EED rispetto alla guida non ottimizzata
Programmazione non lineare	Fino al 25%
Logica Fuzzy	Da 25% al 30%
Algoritmi genetici	Dal 30% al 40%

La performance migliore è ottenuta utilizzando gli algoritmi genetici a parità di aumento del tempo di viaggio. D'altro canto, gli algoritmi genetici sono non-deterministici, e questo significa che il livello di prestazione può non essere sempre lo stesso per tutte le volte che l'algoritmo viene fatto lavorare.

In questo documento ci concentreremo solo sulla tecnica degli algoritmi genetici, rimandando alla letteratura un eventuale approfondimento sull'utilizzo delle altre due tecniche di ottimizzazione.

Esempio comparativo di un diagramma di trazione di un treno con guida non ottimizzata e EED

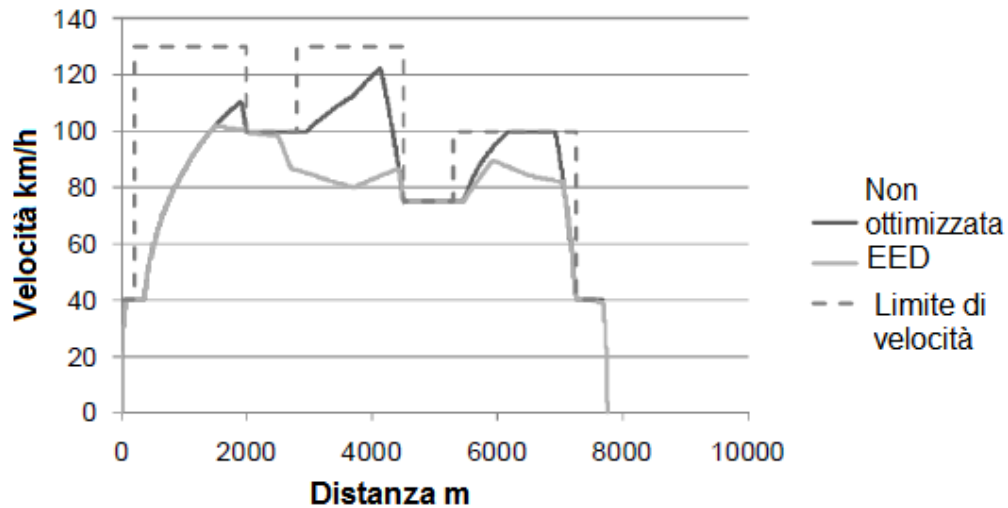


Figura 3.1 Confronto tra una guida non ottimizzata e una ottimizzata

3.2 Tecnica di ottimizzazione

La tecnica di ottimizzazione proposta in [11] si basa sull'utilizzo di un algoritmo genetico. L'algoritmo genetico è un algoritmo stocastico basato sui principi della genetica, della selezione naturale e dell'evoluzione Darwiniana, con la sopravvivenza dell'individuo con il bagaglio genetico più adatto a sopravvivere nell'ambiente in cui vive, permettendogli la riproduzione e la trasmissione dei geni migliori ai suoi figli. Nel nostro caso, non trattandosi di esseri viventi, i cromosomi del bagaglio genetico coinvolti nel processo saranno stringhe di bit, e le condizioni ambientali a cui questi si dovranno adattare sarà una funzione detta di fitness, in cui si potranno valutare diversi fattori, in modo da ottimizzare i diversi obiettivi da noi scelti. Questa tecnica può essere utilizzata anche in altri ambiti, adattando opportunamente obiettivi e partecipanti alla selezione.

3.2.1 Tabella di controllo marcia d'inerzia

La tabella di controllo marcia d'inerzia dà un'indicazione all'ATO su quale azione intraprendere durante la marcia, che sia quella di accelerare, frenare o utilizzare la marcia d'inerzia (in inglese *coasting march*) purché queste non influiscano sulla sicurezza o l'accuratezza nella posizione di arresto del treno.

La sequenza inizia sempre con un comando di marcia d'inerzia (*coasting*), procedendo con un comando di trazione. In questo modo, i comandi usualmente si alternano tra *coasting* e trazione. Il numero di comandi può essere pari o dispari. Nel caso in cui siano pari l'ultimo comando indica al treno di mettere in atto le procedure per arrestarsi alla stazione designata. In caso siano dispari, l'ultimo comando è quello di mantenere la marcia d'inerzia. In questa situazione l'ATO può ignorare la tabella ed effettuare il controllo della frenata e portare il treno a destinazione con precisione. In ogni caso la velocità limite imposta dall'ATP scavalca il comando della tabella di marcia in modo da mantenere il treno al di sotto del limite di velocità massima consentita.

Un esempio di tabella di controllo marcia d'inerzia e il relativo digramma di velocità è riportato in figura 3.2:

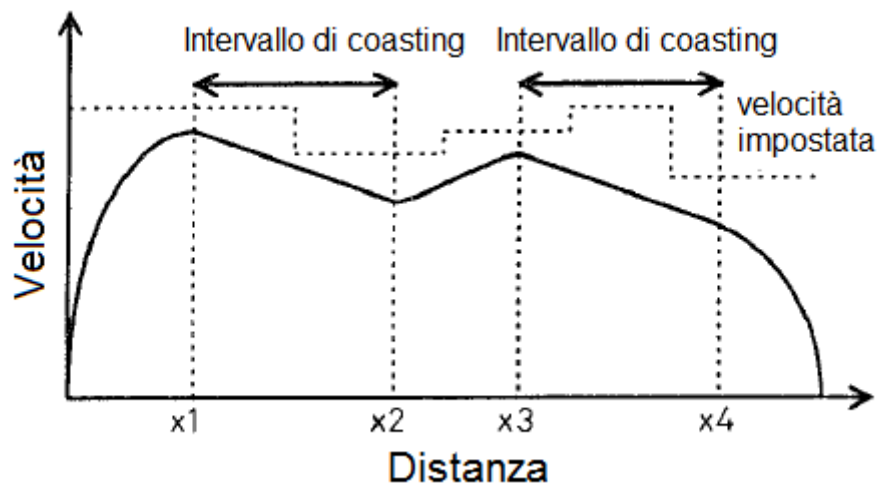


Figura 3.2 Esempio diagramma velocità distanza corrispondente alla Tabella 3.2

Tabella 3.2 Esempio di tabella di controllo marcia d'inerzia

Distanza (m)	Decisione
x1	Coasting
x2	Trazione
x3	Coasting
x4	Arresto

3.2.2 Rappresentazione in cromosomi della tabella di controllo

Ogni cromosoma contiene tutte le informazioni della tabella di controllo. Quindi, ogni cromosoma ha lunghezza variabile e contiene geni con un numero fisso di bit. Ogni gene rappresenta la posizione relativa tra le stazioni dove il comando viene dato, come mostrato in figura 3.3, dove viene rappresentata la tabella 3.2 dell'esempio precedente:

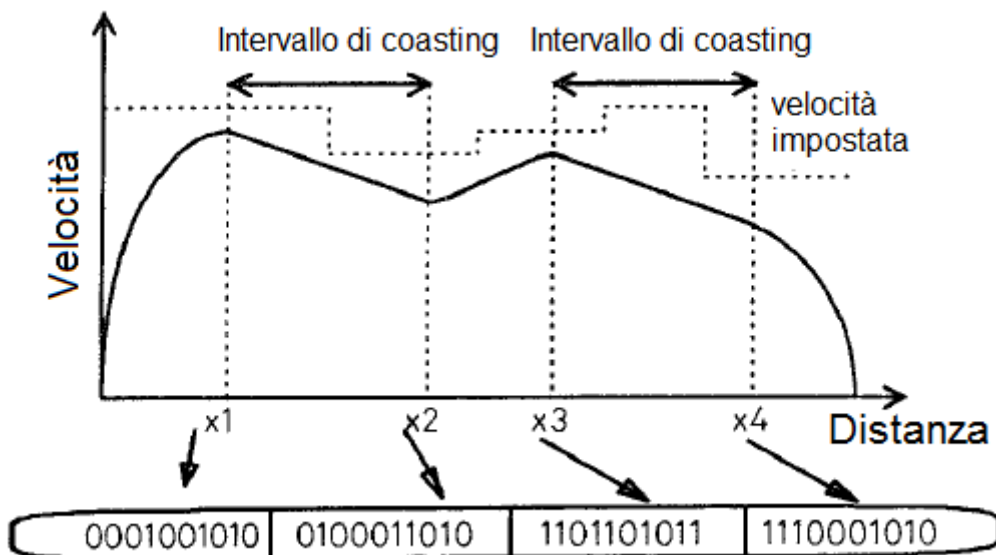


Figura 3.3 Esempio di rappresentazione in cromosomi delle relative posizioni

Nell'esempio il cromosoma consiste in quattro geni e ogni gene ha lunghezza di 10 bit. L'ordine dei geni nel cromosoma indica una specifica decisione della tabella di controllo. I geni dispari rappresentano il comando di coasting. Quelli in posizione pari rappresentano il comando di iniziare la trazione. Se il cromosoma ha un numero pari di geni, l'ultimo gene rappresenta il comando di decelerare il treno sino a fermarsi a destinazione. In questo modo la rappresentazione cromosomica è coerente con la tabella di comando.

3.2.3 Rappresentazione della posizione attraverso i geni

Ogni gene all'interno del cromosoma rappresenta la posizione relativa tra le due stazioni dove il comando viene dato. Nel caso di geni a 10 bit come nell'esempio, la distanza tra le stazioni può essere divisa in 2^{10} (1024) posizioni discrete. Per incrementare la risoluzione o per distanze maggiori si può utilizzare un numero maggiore di bit. Per esempio con una distanza tra le stazioni di 985m il primo gene x1 dell'esempio riportato avente genotipo 0001001010 (74 in decimale) rappresenta una distanza di $(74/1024) * 985 = 71,2$ m dalla stazione di partenza. Visto che il comando corrisponde ad un gene di numero dispari, x1 rappresenta un comando di coasting, il che significa che il treno inizierà la marcia d'inerzia dopo aver percorso 71,2 m dalla partenza.

È importante notare che i geni sono di un ordine tale che i bit al loro interno sono disposti in un ordine crescente. Questo significa che il gene di ordine maggiore rappresenta la posizione più lontana dalla stazione di partenza rispetto al gene di ordine minore. Gli algoritmi genetici in linea di massima mantengono l'ordine dei geni nei cromosomi.

3.3 Implementazione dell'algoritmo genetico

Gli algoritmi genetici convenzionali contengono tre stadi principali: la riproduzione, il crossover, la mutazione. Per migliorare la qualità dei risultati e migliorare l'efficienza della convergenza, si aggiungono altri tre passaggi: la duplicazione dei geni, la cancellazione dei geni e il riordino di questi nel cromosoma. Questi

ultimi tre non sono strettamente necessari e non vengono sempre implementati nelle tecniche di ottimizzazione.

3.3.1 Riproduzione, crossover e mutazione

Il primo passaggio da effettuare è quella della riproduzione. La riproduzione necessita della selezione dei cromosomi genitori tra i cromosomi disponibili della generazione precedente. La scelta deve rispettare due requisiti chiave: il primo è che i due cromosomi abbiano lo stesso numero di geni, fondamentale per il passaggio successivo; il secondo è che i due cromosomi siano quelli con le caratteristiche genetiche migliori, ricalcando il principio biologico della sopravvivenza del più forte. Una volta selezionati i due cromosomi genitore, si procede alla vera e propria riproduzione, dove si creano una serie di cromosomi figli, ottenuti dalla ricombinazione casuale dei geni dei due genitori.

Nel processo degli algoritmi genetici, i cromosomi figli hanno ognuno una certa probabilità di avere un punto casuale di crossover, dove può avvenire uno scambio di informazioni tra i due cromosomi. Inoltre anche ogni singolo bit ha una piccola probabilità di cambiare il proprio stato passando a quello opposto; questa operazione è detta mutazione. Il processo di crossover e di mutazione sono rappresentati in figura 3.4:

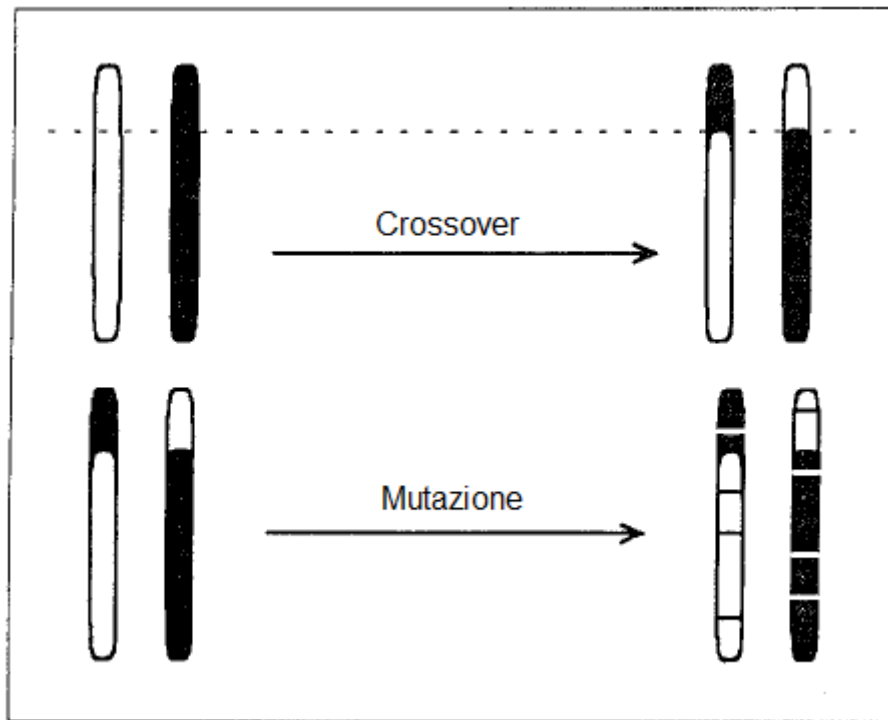


Figura 3.4 Crossover e mutazione

3.3.2 Duplicazione e cancellazione dei geni

Biologicamente, la duplicazione dei geni e la loro cancellazione sono considerati un disturbo genetico che porta alla formazione di cromosomi di lunghezza maggiore o inferiore dell'originale. Lo stesso concetto è utilizzato in alcune tecniche di ottimizzazione per riprodurre cromosomi con differente lunghezza rispetto a quella dei genitori. Durante la duplicazione, un gene nel cromosoma viene duplicato ed allegato al nuovo cromosoma. In caso si presenti l'evento della cancellazione, un gene scelto a caso è cancellato ed il risultato è un cromosoma più corto. Il processo è rappresentato in figura 3.5:

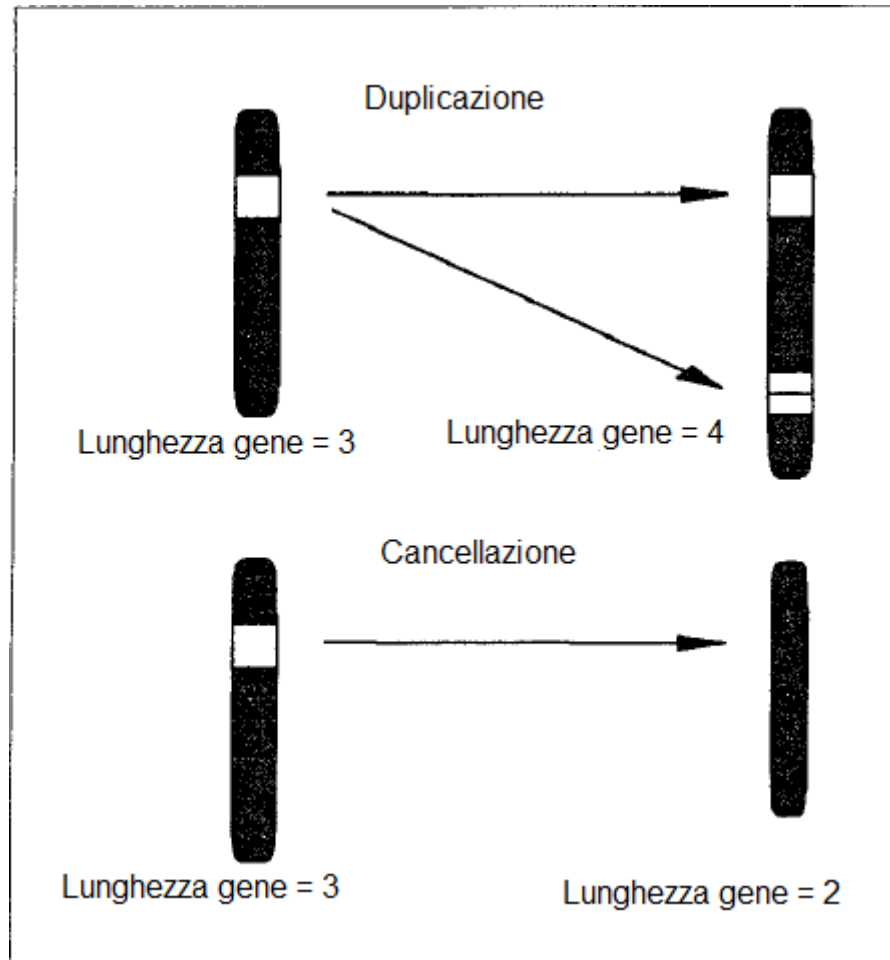


Figura 3.5 Duplicazione e cancellazione

Naturalmente la diversa lunghezza di un cromosoma modifica l'ordine dei comandi, visto che questi sono diversi nel caso in cui si abbiano un numero pari o dispari di geni.

3.3.3 Riordino dei geni nel cromosoma

I geni sono riordinati per mantenere la disposizione all'interno del cromosoma tale che il loro fenotipo sia in ordine crescente. Quest'ordine può essere modificato

durante i processi di crossover e di mutazione, dove viene cambiato il valore numerico binario del gene. Poiché l'ordine di ogni gene nel cromosoma rappresenta un comando specifico ad una determinata distanza, il riordino dei geni nel cromosoma assicura che i geni con comandi corrispondenti siano accoppiati insieme, mettendoli in ordine di distanza crescente dalla stazione di partenza. Senza questo processo di riordino dei geni, l'algoritmo manca nel requisito di efficienza nella convergenza.

3.4 Valutazione della funzione di fitness

Ogni cromosoma rappresenta una tabella di controllo e la funzione di fitness rappresenta quanto meglio il controllo di coasting che ne deriva risponde ai requisiti desiderati in sede di progetto. I requisiti tipicamente sono rispettare l'orario di arrivo, l'abilità di minimizzare l'energia consumata ed assicurare il comfort dei passeggeri. L'obiettivo dunque è valutare la funzione di fitness per ogni cromosoma ottenuto e far sopravvivere solo i cromosomi che la massimizzano, utilizzandola come indicatore di performance della rispettiva tabella di controllo. La funzione di fitness utilizzata in [11] per monitorare l'energia consumata dal treno E , la puntualità ρ , e il benessere dei passeggeri valutandolo attraverso il calcolo del jerk J durante una determinata tratta è la seguente:

$$Fitness = \frac{1}{E \cdot f_p(\rho) \cdot f_J(J)} \quad (3.1)$$

dove $f_p(\rho)$ è il fattore di penalità per i ritardi e $f_J(J)$ il fattore di penalità per jerk. Sotto determinate circostanze in cui il treno è puntuale e con un accettabile livello di comfort dei passeggeri, i due fattori di penalità avranno un valore circa uguale a 1. In questo caso, massimizzare la funzione di fitness equivale a minimizzare l'energia utilizzata. Dove il treno sia in ritardo o in anticipo, il fattore di penalità per i ritardi incrementa o decrementa esponenzialmente in funzione della deviazione temporale. Allo stesso modo, il fattore di penalità per jerk aumenterà in caso di una valutazione di jerk eccessiva.

In letteratura si trovano altre funzioni di fitness come in [12], dove si valutano due funzioni di fitness, una per l'energia e una per il tempo di percorrenza e si

massimizzano entrambe; in questo caso non viene considerato il jerk. Si rimanda alla bibliografia per un approfondimento su questa funzione di fitness.

3.4.1 Energia consumata dal treno E

La totale energia consumata dal treno può essere stimata come segue:

$$E = \frac{\int Fvdt}{\eta_M} + At + \eta_B \int Bvdt \quad (3.2)$$

dove F è lo sforzo di trazione (N), B è lo sforzo meccanico di frenatura (N), v è la velocità (m/s), A è la potenza richiesta dagli ausiliari del treno (W), t è il tempo di percorrenza tra due stazioni (s), η_M è il fattore moltiplicativo per convertire l'energia elettrica in energia meccanica durante la trazione, e η_B è il fattore moltiplicativo per convertire l'energia meccanica in energia elettrica ottenuta durante la frenatura.

Il quantitativo di energia recuperata durante la frenatura è pesantemente soggetto al valore della tensione in linea in quel momento. Con la misura o con la stima del valore di tensione si può stimare il fattore moltiplicativo, ma per questo si rimanda alla letteratura e in prima approssimazione si può ritenere che la linea sia sempre in condizione di ricevere l'energia recuperata. Per un calcolo più accurato, conviene porre un limite al valore della potenza massima iniettabile in linea, in quanto innalzerebbe oltre il limite il valore della tensione permanente, posto dalle norme a +20% del valore nominale.

3.4.2 Fattore di penalità per i ritardi

L'indice di puntualità ρ , è definito come la differenza in secondi tra il tempo reale di arrivo e quello programmato. Il fattore ρ è positivo se il treno è in ritardo e negativo se è in anticipo. Il suo valore diventa zero se il treno è in orario.

Il fattore di penalità per i ritardi può essere interpretato come un incremento addizionale di energia consumata per recuperare un treno non in orario di un unità di tempo. Il suo valore sarà positivo per un valore di ρ positivo o negativo e pari a 1 quando ρ è zero.

Come esempio riportiamo la valutazione del fattore di penalità per i ritardi proposta in [11].

Se un treno è in ritardo di ρ secondi, l'incremento del fattore di penalità, Δf_ρ , per ripianificare di $\Delta\rho$ il treno può essere definito come segue:

$$\Delta f_\rho = k_1 \Delta\rho f_\rho \quad (3.3)$$

dove k_1 è la costante relativa all'incremento addizionale di energia per recuperare un secondo di ritardo. Passando a intervalli infinitesimali:

$$df_\rho = k_1 f_\rho d\rho \quad (3.4)$$

$$\frac{1}{f_\rho} df_\rho = k_1 d\rho \quad (3.5)$$

Integrando da ρ a zero la (3.5), la funzione che rappresenta il fattore di penalità per i ritardi può essere ottenuta come segue:

$$\int_1^{f_\rho} \frac{1}{f_\rho} df_\rho = \int_0^\rho k_1 d\rho \quad (3.6)$$

$$f_\rho(\rho) = e^{k_1 \rho} \quad (3.7)$$

Alternativamente l'equazione può essere approssimata come segue

$$f_\rho(\rho) = (1 + c_p)^{\rho/\tau} \quad (3.8)$$

dove c_p è l'incremento di energia utilizzato dalla regolazione di velocità per far recuperare al treno τ secondi.

Possiamo estendere lo stesso concetto al caso in cui il treno sia in anticipo, cioè quando ρ è negativo e c_p potrebbe avere un valore positivo più piccolo.

L'andamento qualitativo del fattore di penalità per i ritardi è rappresentato in figura 3.6

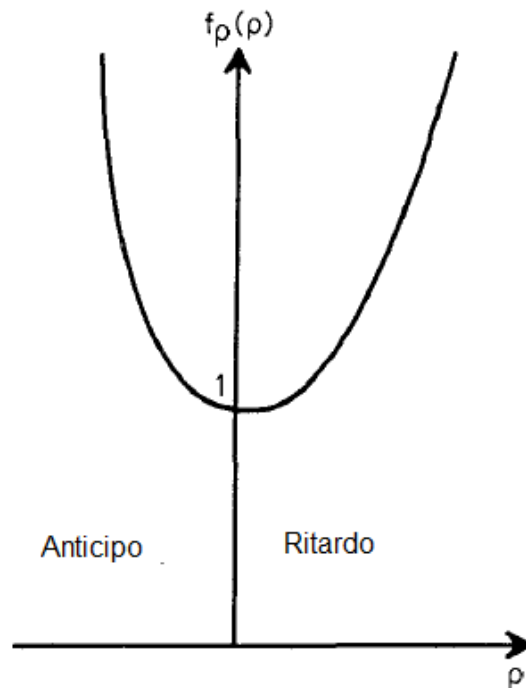


Figura 3.6 Andamento del fattore per i ritardi

In base alla strategia di ottimizzazione che si vuole adottare, si può modificare la funzione che restituisce il fattore moltiplicativo da inserire nella funzione di fitness in modo da far pesare più o meno i ritardi. In questo modo si possono ottenere soluzioni che prediligono la puntualità oppure la quantità di energia risparmiata.

3.4.3 Fattore di penalità per jerk

Il jerk medio J del treno è definito come:

$$J = \frac{1}{t} \int \left| \frac{da}{dt} \right| dt \quad (3.9)$$

dove a è l'accelerazione del treno (m/s^2); e t è il tempo totale di viaggio tra le stazioni (s), e viene utilizzato in [11] per valutare il benessere dei passeggeri.

Esistono altre modalità di valutazione del jerk che tengono in considerazione altri parametri quali il limite della rapidità di cambiamento del valore di accelerazione, definendo un di jerk limite, oppure quelli che contano il numero di cambi di manovre tra gli stati di trazione, inerzia, frenatura. A prescindere da come si valuta il jerk, il fattore di penalità segue sempre la stessa logica.

Il fattore di penalità per jerk può essere interpretato come l'incremento di energia richiesta dal treno per ridurre il jerk J più vicino alla soglia massima H . la soglia può essere impostata ad un valore desiderato che soddisfi un livello accettabile di benessere dei passeggeri.

La funzione che rappresenta il fattore di penalità può essere approssimata come segue, come mostrato in [11]:

$$f_J(J) = \begin{cases} (1 + c_J)^{(J-H)/h} & J > H \\ 1 & J \leq H \end{cases} \quad (3.10)$$

dove c_J è l'incremento dell'energia necessaria per portare il livello di jerk dal valore h sotto la soglia H .

Detto questo al disotto del valore di soglia, non vengono assegnate penalità. Il grafico qualitativo è riportato in figura 3.7:

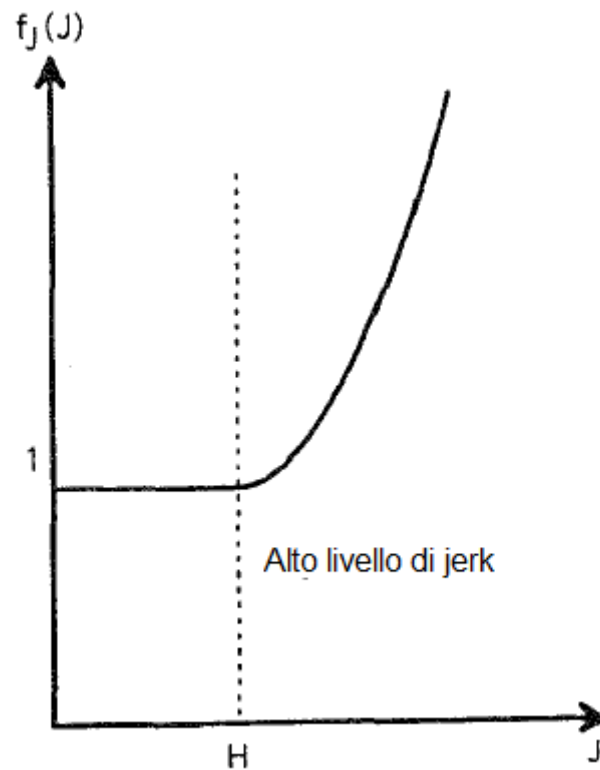


Figura 3.7 Andamento del fattore di penalità per jerk

3.5 Struttura generale di un algoritmo genetico

Per concludere riportiamo in tabella 3.3 un riassunto dei passaggi necessari ad implementare un'ottimizzazione con l'utilizzo di un algoritmo genetico, come mostrato in [11]:

Tabella 3.3 Passaggi di un algoritmo di ottimizzazione

Creazione dei cromosomi a partire dalle tabella di controllo
Riproduzione
Crossover
Mutazione
Duplicazione e Cancellazione (facoltativi)
Riordino geni
Creazione tabella di controllo
Simulazione
Valutazione del fitness
Scelta profilo migliore e sopravvivenza dei rispettivi cromosomi

3.6 Elitarismo

Nell'implementazione della maggior parte degli algoritmi genetici, tutti i cromosomi della vecchia generazione periscono e la generazione presente comprende solo i nuovi discendenti. Questo però non esclude la possibilità che alcuni geni buoni non siano sopravvissuti e quindi non presenti nella nuova generazione. Questo dipende molto anche dal metodo utilizzato per la scelta dei cromosomi genitori, come il metodo a torneo utilizzato in [11] a cui rimandiamo per ulteriori approfondimenti. Anche selezionando sempre i cromosomi migliori, è possibile che i discendenti abbiano performance inferiori a quelle della generazione precedente, perdendo il requisito della convergenza alla soluzione ottima. Per ovviare a questo in molti algoritmi si sceglie di mettere in pratica l'elitarismo, cioè far sopravvivere nella nuova generazione anche l'élite della vecchia, facendola partecipare al processo di riproduzione, se dopo la valutazione del fitness dei figli, nessun cromosoma risulta migliore dei precedenti.

3.7 Sopravvivenza dell'alternativa migliore

Il cromosoma migliore alternativo è il cromosoma che risponde ai requisiti di fitness, ma ha una lunghezza differente dal migliore in assoluto. Esso ha diritto a

partecipare al processo di riproduzione della nuova generazione. La logica che permette la sopravvivenza del cromosoma migliore alternativo è quella di accrescere le possibilità di produrre soluzioni alternative di dimensione differente e di prevenire la convergenza dei risultati attorno ad un punto di ottimo locale.

3.8 L'ottimizzazione su linee non automatizzate

I risultati ottenuti dalla tecnica di ottimizzazione, ovvero le posizioni dove iniziare il coasting e la trazione, si prestano molto bene ad essere utilizzati su linee completamente automatizzate, dove devono comunque essere implementati i comandi da dare all'ATO. Se poi si dispone di una potenza di calcolo sufficientemente elevata, si può prevedere di creare una strategia di guida ogni qualvolta un treno si avvicina ad un nuovo tratto di linea, adattando la soluzione alle condizioni in tempo reale della tratta, quali numero di passeggeri, limiti temporanei, condizione del treno, ecc.

Nelle linee tradizionali con macchinista, l'utilizzo dei risultati ottenuti attraverso le tecniche di ottimizzazione si traducono solitamente in corsi di formazione proposti ai macchinisti sulla tecnica di guida da intraprendere sulla linea interessata, tali da fornire una sensibilità al risparmio energetico adeguato e una conoscenza approfondita sulla conformazione del tracciato. Assolutamente da evitare sono le penalizzazioni a chi non rispetta una guida energeticamente efficiente, in quanto la priorità di un sistema di trasporto pubblico è comunque garantire nei limiti del possibile la puntualità e il rispetto della tabella di marcia. Se un treno è in ritardo il macchinista deve avere la priorità di recuperarlo senza dover incorrere in sanzioni per aver consumato più energia. Altra soluzione da evitare sono le segnalazioni in cabina, in quanto possono distrarre il conducente da altre funzioni vitali per la sicurezza.

Capitolo 4

Sviluppo di una tecnica di ottimizzazione

4.1 Descrizione dell'algoritmo genetico

In questo capitolo si descriveranno le scelte e le strategie utilizzate per sviluppare una tecnica di ottimizzazione, basandosi sui concetti esposti nel capitolo 3, sfruttando le potenzialità di calcolo del programma MATLAB R2014a.

Verrà inoltre progettato e implementato in Simulink un modello che simulerà il comportamento del treno automatico. Nelle appendici A e B si possono trovare i codici finali utilizzati per questo lavoro.

L'algoritmo sviluppato prevede la creazione automatica di 16 cromosomi iniziali derivati a partire da altrettante tabelle di controllo generate casualmente dal sistema. Da questi 16 cromosomi, verranno selezionati i due che massimizzano la funzione di fitness e utilizzati come primi genitori nei passaggi successivi.

Si è scelto per motivi di semplicità di implementazione di limitare il numero di comandi a quattro, comprendendo il comando di fermata in stazione. Un numero superiore a 5 comandi comunque non darebbe sostanziali miglioramenti riguardo all'energia risparmiata, come mostrato nell'articolo [10] e riportato in figura 4.1. In questo modo i cromosomi hanno tutti quattro geni, e sono composti da 10 bit ciascuno.

Vengono implementati i passaggi di riproduzione, crossover, mutazione e riordino dei geni. Vengono invece tralasciati i passaggi di duplicazione e cancellazione, anche se ricordiamo che l'algoritmo può creare due geni con genotipo uguale, per esempio il primo comando di trazione e il successivo comando di coasting, entrambi alla posizione $x=x_2=x_3$, portando così praticamente ad una cancellazione del comando di trazione e continuando il coasting precedente.

L'algoritmo permette di creare otto cromosomi figli alla volta. Le probabilità di crossover tra due cromosomi figli viene impostata al 5%, e la probabilità di mutazione di ogni singolo bit è del 5%.

Una volta calcolata la funzione di fitness per ogni cromosoma figlio, si procede alla selezione dei nuovi genitori per la generazione successiva, la quale prevede si stillare una graduatoria selezionando i due cromosomi che massimizzano la funzione di fitness. In questa graduatoria vengono valutati anche i due cromosomi genitore della generazione precedente, inserendo un elitarismo nella selezione. Completata la selezione, l'algoritmo ripete le operazioni necessarie a creare una nuova generazione. Il numero di iterazioni del processo è scelto dall'operatore.

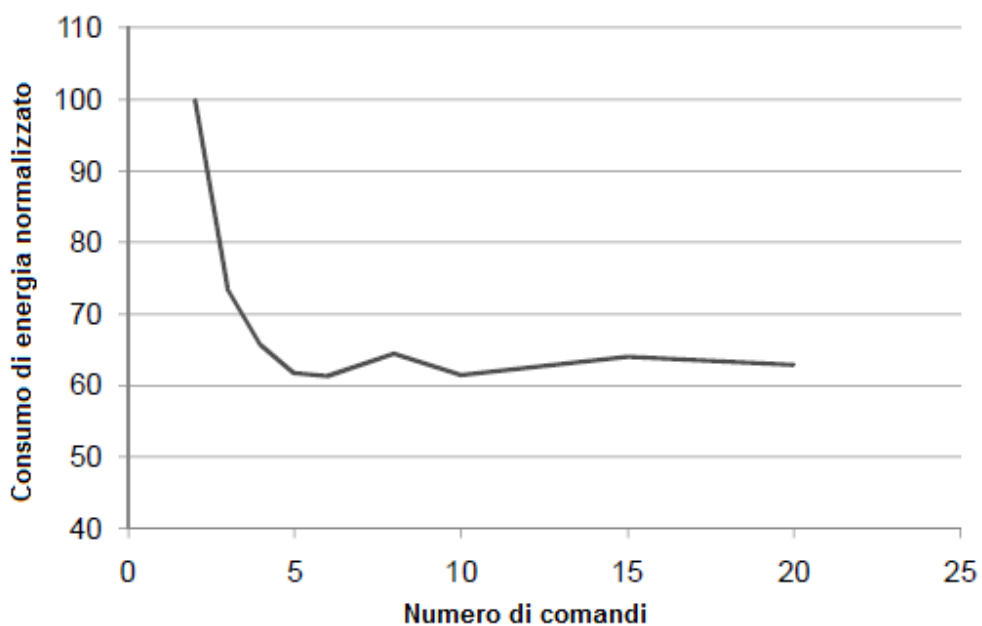


Figura 4.1 Andamento del consumo di energia rispetto al numero di comandi

4.2 Descrizione del simulatore

Per ottenere l'energia consumata dal treno e il tempo di percorrenza della tratta, è stato programmato un simulatore utilizzando MATLAB Simulink.

Il treno viene modellizzato come un punto materiale di massa pari alla massa equivalente, data dalla formula 4.1

$$m_e = m(1 + 0,06 + 0,15) \quad (4.1)$$

dove m è la massa del veicolo. La massa equivalente di tutte le masse rotanti viene posta pari a 0,06 volte la massa del veicolo e si stima che la massa media dei passeggeri trasportata valga 0,15 volte la massa del veicolo, come ipotizzato anche in [12].

Per la determinazione della dinamica viene utilizzata la (1.1), dove F è data dalla caratteristica meccanica dei motori, riportata in figura 4.3.

Per il calcolo della resistenza all'avanzamento piano e rettilineo r_0 viene utilizzata la formula (1.10) con le relative considerazioni rispetto al profilo aerodinamico del mezzo, per la resistenza dovuta alla pendenza la (1.16) e per la resistenza dovuta alle curve la (1.18). Si considera valida l'approssimazione che tutte le componenti della resistenza al moto siano proporzionali al peso G del veicolo, in modo da poter utilizzare le formule (1.19) e (1.20) per calcolare la resistenza totale al moto R .

Per il calcolo dell'energia consumata si utilizza l'espressione (3.2), considerando che al di sotto della velocità di 10 km/h la frenatura a recupero venga interrotta e subentri la frenatura meccanica, e si limita la massima potenza iniettabile in linea a 2,25 MW, come proposto anche in [10]. Si ipotizza inoltre in prima approssimazione che la linea di contatto sia sempre in condizione di riceverla.

Come dati di ingresso al simulatore si richiedono i dati del veicolo quali:

- La massa del veicolo
- La potenza elettrica totale dei motori
- Il rendimento per convertire l'energia elettrica in energia meccanica durante la trazione e viceversa durante la frenatura a recupero
- Lo sforzo massimo di trazione
- La potenza assorbita dagli ausiliari

I dati del tracciato quali:

- Lunghezza del percorso
- Limiti massimi di velocità
- Pendenze e loro durata
- Raggio delle curve e loro durata

4.3 Funzione di Fitness

La funzione di fitness scelta è del tipo:

$$Fitness = \frac{1}{E * f(\rho)} \quad (4.2)$$

con E l'energia consumata restituita dal simulatore con l'utilizzo della (3.2) misurata in MJ e $f(\rho)$ il fattore di penalità per i ritardi, che verrà descritto nel dettaglio in seguito.

Il fattore di penalità per jerk non viene implementato, perché la nostra scelta di valutazione del jerk si basa sul numero massimo di variazioni degli stati di trazione, marcia d'inerzia e frenatura e, visto che il numero massimo di comandi possibili della tabella di controllo è di quattro, e non essendo un numero eccessivo questo garantisce un comfort accettabile ai passeggeri. Ricordiamo comunque che anche in altri studi fatti [12], il jerk non viene considerato nella valutazione della funzione di fitness.

4.4 Fattore di penalità per i ritardi

Per il calcolo del fattore di penalità per i ritardi viene utilizzata la formula (3.8). Il fattore c_p , che come ricordiamo indica l'incremento di energia per recuperare un secondo di ritardo, viene impostato pari a 0,02; ciò equivale a dire che un secondo di ritardo è penalizzato con un aumento dell'energia del 2%. Ritardi maggiori vengono penalizzati con aumenti esponenziali dell'energia consumata.

La (3.8) viene così a modificarsi:

$$f(\rho) = 1,02^\rho \quad (4.3)$$

con ρ la differenza in secondi tra il tempo di percorrenza programmato e il tempo di percorrenza effettivo.

Il tempo di viaggio programmato viene calcolato a partire da quello a guida non ottimizzata (lo stile di guida che permette i tempi di percorrenza minori) maggiorandolo del 10%:

$$t_{programmato} = 1,10 \cdot t_{flatout} \quad (4.4)$$

con $t_{flatout}$ il tempo di guida non ottimizzato, trovato facendo lavorare il simulatore senza fornire i comandi di coasting.

In tabella 4.1 vengono riportati alcuni valori del fattore di penalità in relazione allo scostamento in secondi dal tempo di viaggio programmato:

Tabella 4.1 Esempio valori del fattore di penalità

Secondi di ritardo	Fattore di penalità
1	1,02
2	1,04
3	1,06
4	1,08
5	1,1
8	1,17
10	1,22

Nel caso in cui la conformazione del tracciato porti ad un risparmio energetico consistente e di conseguenza ad una valutazione del fitness elevata (ad esempio forti discese), senza però stare nell'intorno accettabile del tempo programmato (è stato scelto una banda del 3% rispetto al valore di tempo programmato), si è scelto

di rendere più penalizzante il fattore per i ritardi, elevando il fattore c_p a 0,05. Con questo accorgimento, applicato solo dove l'algoritmo di ottimizzazione dia una soluzione con tempi di percorrenza fuori intervallo, la formula (4.3) viene modificata in (4.5):

$$f(\rho) = 1,05^\rho \quad (4.5)$$

4.5 Controllo di velocità e di fermata in stazione

Per controllare il moto del treno vengono implementati due controllori proporzionale-integrale, uno che controlla la posizione di arresto del treno e uno in cascata che controlla la velocità.

Il primo controllore ha il compito di portare il treno a destinazione con l'ausilio di uno stimatore dello spazio di arresto, modulando il riferimento di velocità tra zero e la velocità massima consentita.

Per stimare lo spazio di arresto del treno si utilizza la formula (4.6):

$$S_f = \frac{v^2}{2a_f} \quad (4.6)$$

con a_f la decelerazione costante media, posta pari a $0,675 \text{ m/s}^2$, e v la velocità istantanea del treno. Si potrebbe implementare anche uno stimatore più accurato che tenga conto della diversa decelerazione massima possibile nei tratti a coppia costante e a potenza costante della caratteristica meccanica dei motori, tuttavia date le buone prestazioni dello stimatore a decelerazione costante media, si è scelto di mantenere questa approssimazione.

Il controllore di velocità modula tra zero e uno la forza di trazione dei motori, data dalla caratteristica meccanica di figura 4.3, per raggiungere la velocità di riferimento data dal controllo di fermata.

Per consentire la simulazione dei comandi di coasting viene posto a valle dei due controllori un inibitore dei comandi del controllore di velocità, che durante le fasi di coasting obbliga a zero la forza di trazione F .

In caso in cui venga generata una tabella di controllo che non porti il treno a più o meno 1,1 m dalla destinazione, il sistema penalizza con un fattore 100 il relativo fitness, in modo da garantire la non sopravvivenza della stessa nell'algoritmo.

Il principio del sistema di controllo è schematizzato in figura 4.2:

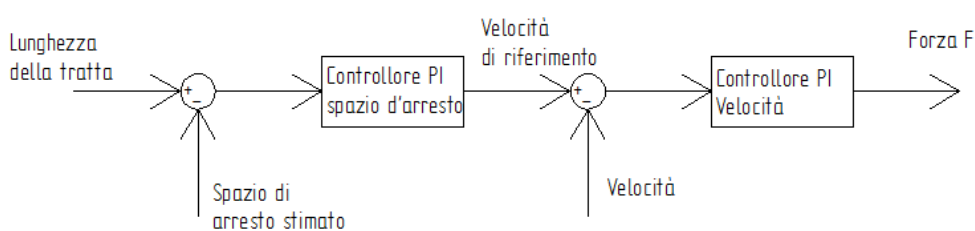


Figura 4.2 Schema di principio del controllore del simulatore utilizzato

4.6 Descrizione del caso studio

Per testare l'algoritmo di ottimizzazione sviluppato, vengono ipotizzate le caratteristiche del treno e del tracciato.

4.6.1 Caratteristiche del treno

In tabella 4.2 vengono riportati i dati necessari al simulatore per riprodurre le caratteristiche del treno:

Tabella 4.2 Caratteristiche del treno del simulatore

Massa del veicolo	295000 kg
Potenza elettrica massima	5000 kW
Rendimento complessivo in trazione	0,85
Rendimento complessivo in frenatura	0,65
Sforzo massimo	300 kN
Potenza degli ausiliari	235 kW

In figura 4.3 viene riportata la caratteristica meccanica di trazione e in figura 4.4 l'andamento della potenza elettrica assorbita dai motori in funzione della velocità, tracciate entrambi con l'ausilio del simulatore:

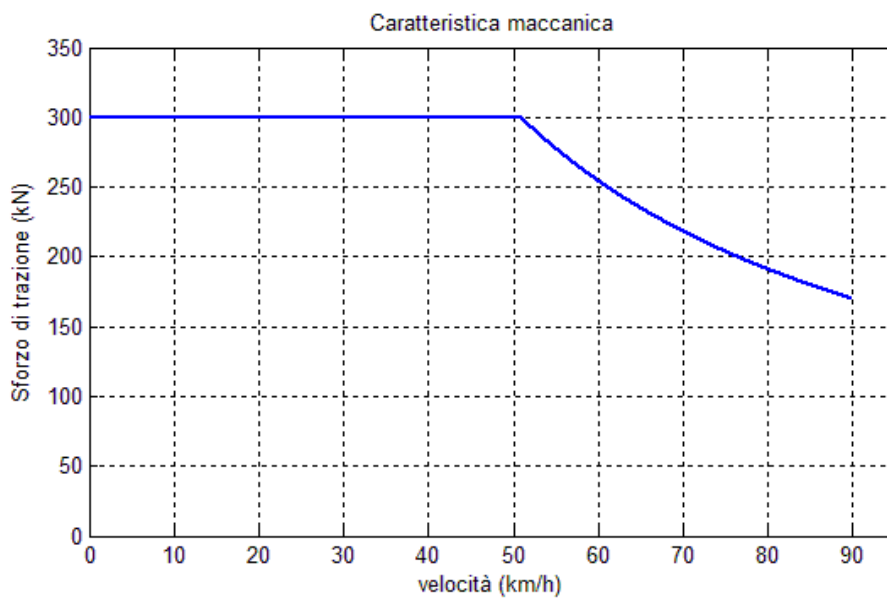


Figura 4.3 Caratteristica meccanica del treno preso come esempio

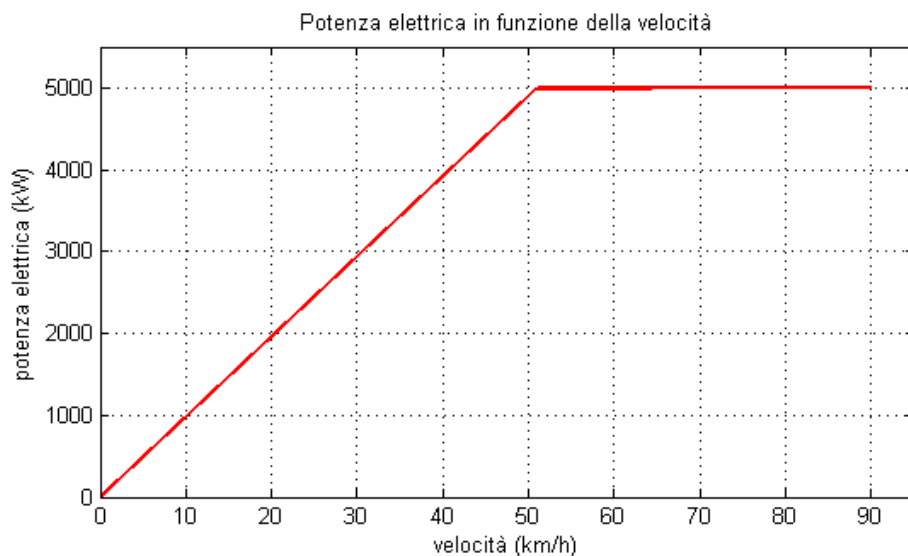


Figura 4.4 Andamento della potenza elettrica dei motori in funzione della velocità del treno preso come esempio

4.6.2 Caratteristiche del tracciato

Il tracciato considerato è lungo 21,973 km ed è composto da 24 stazioni, per un numero di tratte da simulare pari a 22. La lunghezza delle tratte tra le stazioni (Denominate in ordine alfabetico, tralasciando le lettere X e Y) è riportata in tabella 4.3

Tabella 4.3 Lunghezza delle tratte

Tratta	Lunghezza (m)
A-B	916
B-C	1023
C-D	1560
D-E	1190
E-F	802
F-G	1085
G-H	938
H-I	780
I-J	938
J-K	591
K-L	444
L-M	714
M-N	821
N-O	743
O-P	625
P-Q	619
Q-R	773
R-S	407
S-T	764
T-U	936
U-V	757
V-W	3631
W-Z	916

Il profilo altimetrico del tracciato è rappresentata dal grafico in figura 4.5

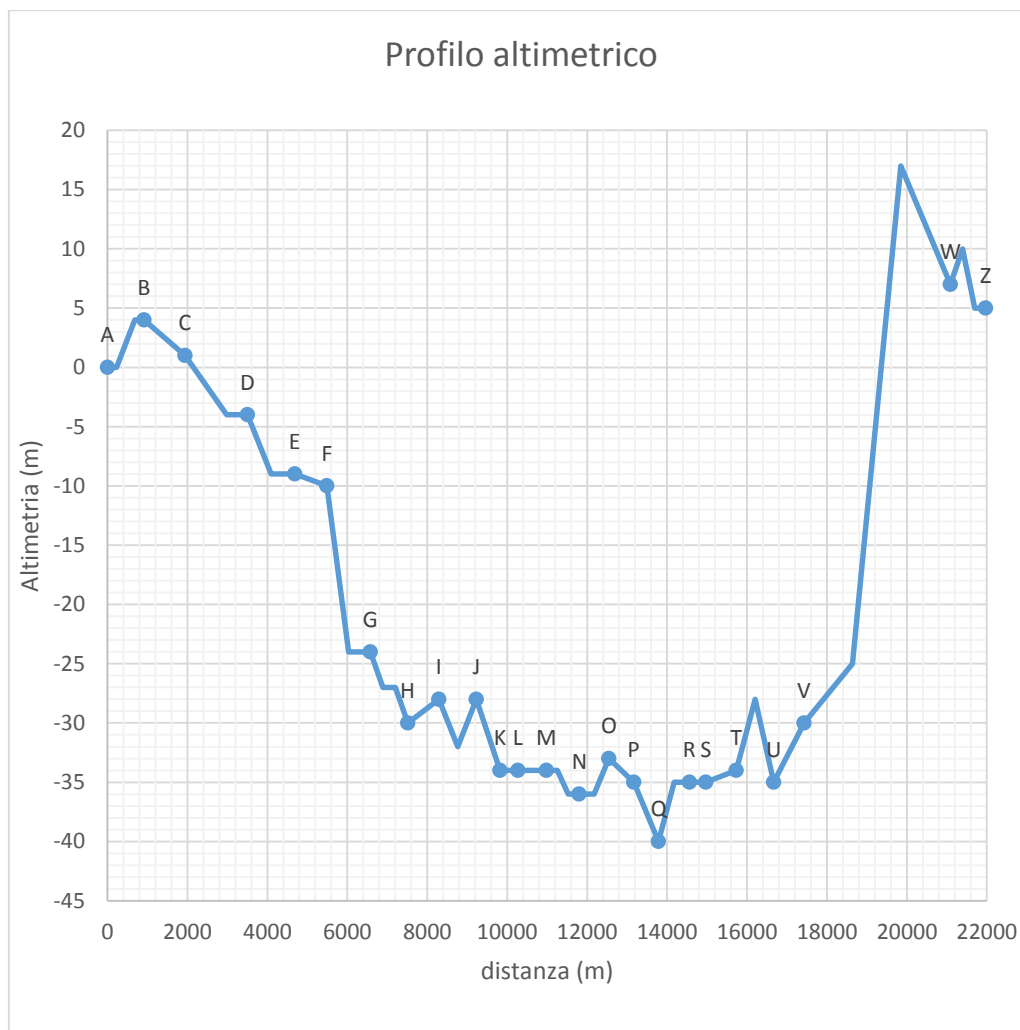


Figura 4.5 Andamento altimetrico del tracciato

I limiti di velocità sono impostati per tutte le tratte pari a 40km/h per i primi 100m e gli ultimi 100m, e di 90km/h per il resto del percorso.

Nella tabella 4.4 sono riportate le tratte che presentano curve, con indicazione del raggio.

Tabella 4.4 Curve del tracciato

Tratta	Raggio (m)
G-H	1000
H-I	1000
I-J	1000
M-N	500

4.7 Consumi energetici con guida non ottimizzata

Per poter calcolare la quantità di energia risparmiata con l'utilizzo dell'algoritmo di ottimizzazione, è necessario innanzitutto calcolare l'energia consumata durante l'esercizio con guida non ottimizzata, che ricordiamo è quello stile di guida che permette tempi di percorrenza più brevi, portandosi sempre alla massima velocità e di decelerare il più tardi possibile.

In tabella 4.5 sono riportati i consumi energetici in MJ ed in kWh e i tempi di percorrenza per ogni tratta.

Tabella 4.5 Consumi energetici e tempi di percorrenza con guida non ottimizzata

Tratta	Energia MJ	Energia kWh	Tempo s
A-B	102,07	28,36	72
B-C	87,3	24,25	75
C-D	117,18	32,55	95
D-E	90,9	25,25	79
E-F	78,68	21,86	68
F-G	55,45	15,40	76
G-H	74,39	20,67	71
H-I	89,26	24,80	68
I-J	93,67	26,02	73
J-K	46,29	12,86	57
K-L	52,5	14,58	51
L-M	75,52	20,98	64
M-N	81	22,50	69
N-O	87,32	24,26	66
O-P	61,92	17,20	60
P-Q	51,51	14,31	58
Q-R	97,03	26,95	69
R-S	48,89	13,58	48
S-T	82,59	22,94	67
T-U	95,5	26,53	74
U-V	95,19	26,44	67
V-W	393,63	109,35	183
W-Z	85,35	23,71	70
Totale	2143,14	595,36	1680

Il tempo totale di viaggio, pari a 28 minuti, non considera i tempi di attesa nelle fermate, che si presuppongono uguali anche nel caso di guida non ottimizzata.

A titolo di esempio riportiamo 3 diagrammi di trazione velocità-tempo per una tratta breve (figura 4.6), una media (figura 4.7) ed una lunga (figura 4.8). I restanti profili si possono trovare nell'appendice D.

Per la tratta breve si è scelta la tratta R-S di lunghezza pari a 407 m.

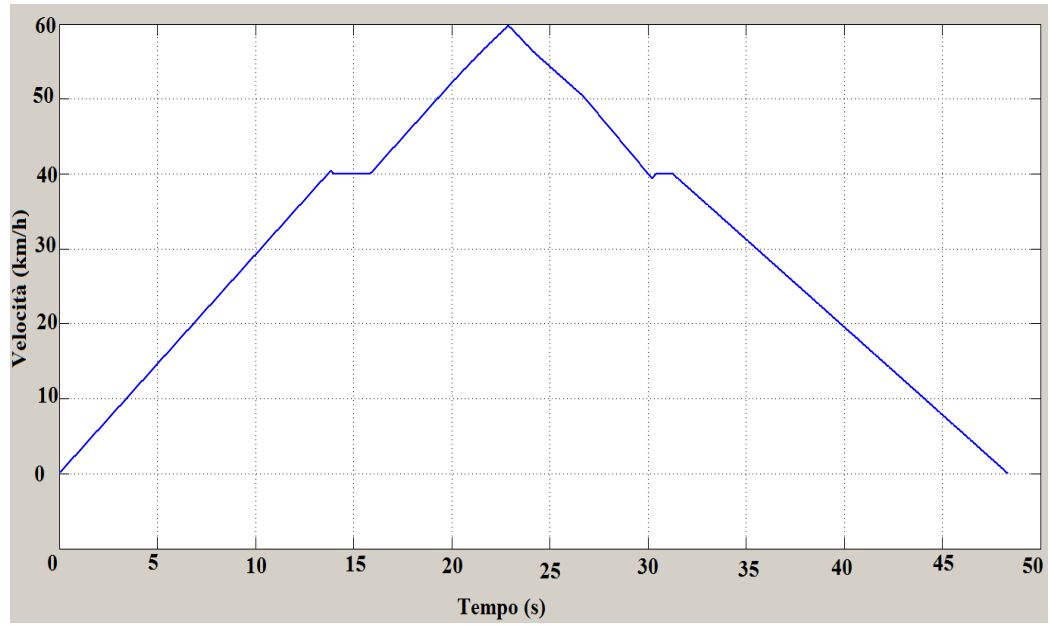


Figura 4.6 Profilo velocità tempo tratta R-S non ottimizzato

Come tratta media si è scelta la tratta M-N, di lunghezza pari a 821 m

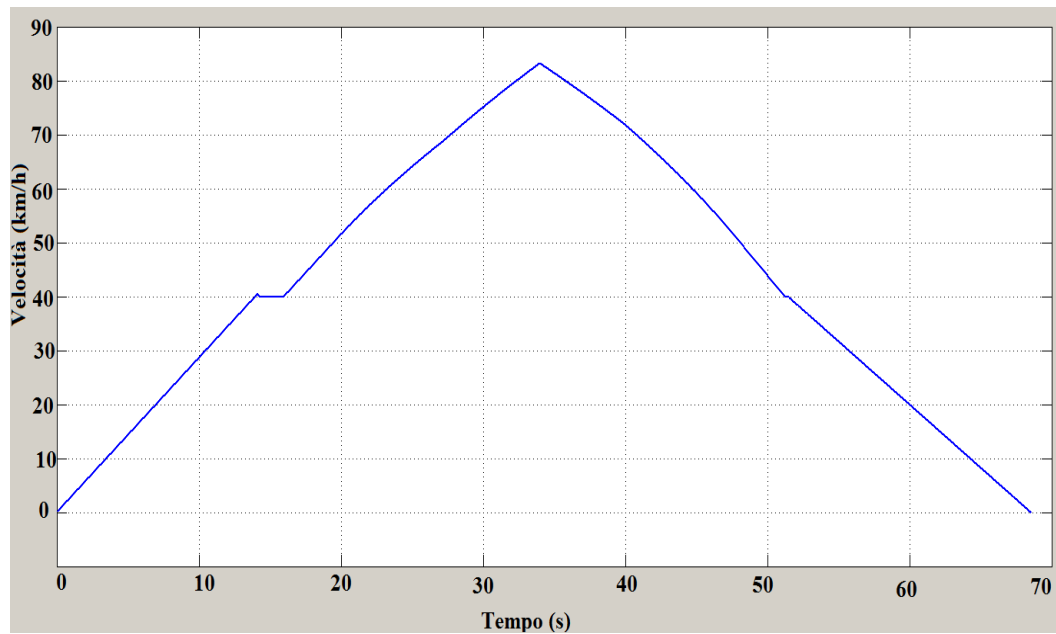


Figura 4.7 Profilo velocità tempo tratta M-N non ottimizzato

Come tratta lunga viene scelta la tratta V-W di 3631 m, la più lunga di tutto il tracciato.

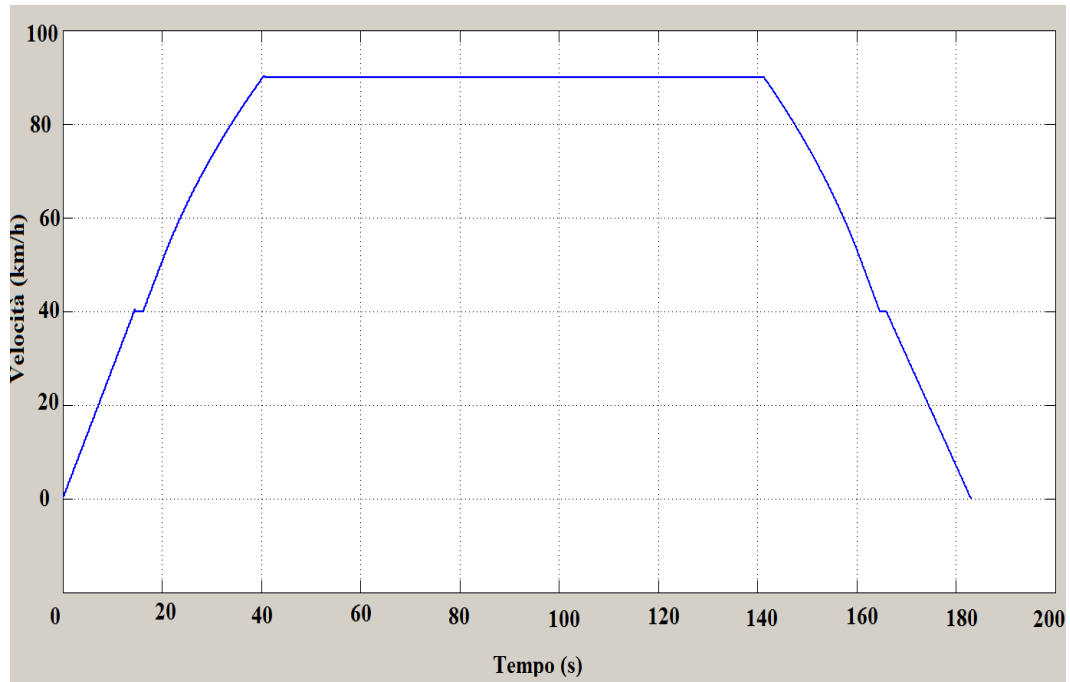


Figura 4.8 Profilo velocità tempo tratta V-W non ottimizzato

4.8 Convergenza dell'algoritmo

Fondamentale per il raggiungimento di una soluzione ottima è impostare correttamente il numero di generazioni che l'algoritmo dovrà creare ed analizzare.

Basandoci sull'esperienza sviluppata da altri articoli come [11] e [12], dove l'algoritmo genetico proposto converge ad un risultato tra la undicesima e la dodicesima generazione, e dove comunque sono simulate sempre più di 15 generazioni, la nostra scelta è caduta su un numero di generazioni pari a 20. A titolo di esempio si riporta in figura 4.9 il grafico di convergenza dell'algoritmo genetico proposto in [11]

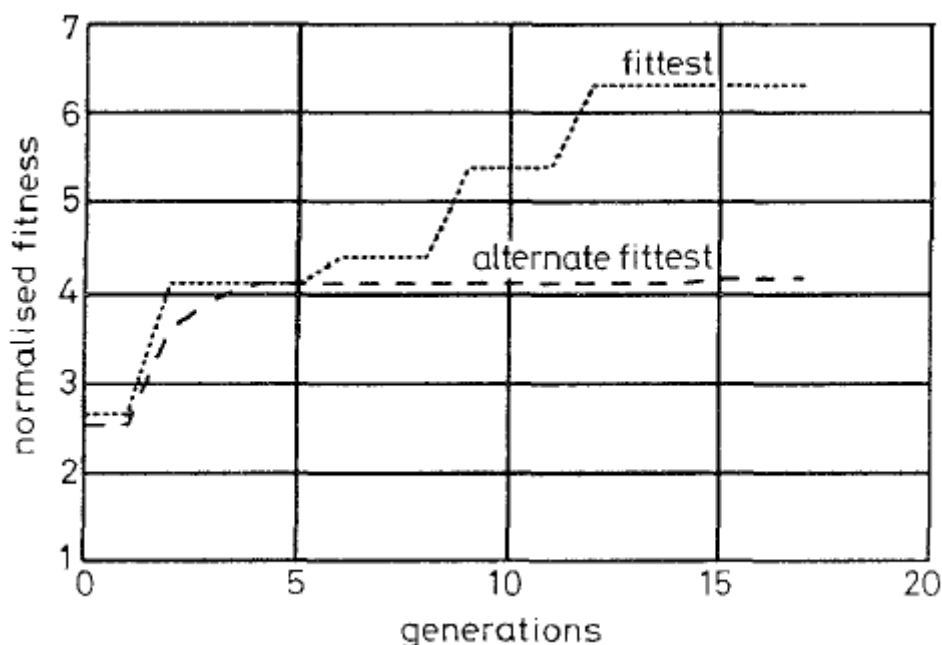


Figura 4.9 Grafico di convergenza dell' algoritmo genetico

4.9 Consumi energetici con guida ottimizzata

In tabella 4.6 vengono riportati i consumi energetici ed i tempi di percorrenza ottenuti mediante la tecnica di ottimizzazione proposta. Nelle tratte evidenziate in giallo si utilizza la (4.5) per la valutazione del fattore di penalità per i ritardi, in quanto l' utilizzo della (4.3) non portava a soluzioni accettabili riguardo i tempi di percorrenza.

Tabella 4.6 Consumi energetici e tempi di percorrenza guida EED

Tratta	Energia MJ	Energia kWh	Tempo s
A-B	77,82	21,62	79
B-C	51,02	14,17	85
C-D	76,66	21,30	107
D-E	61,1	16,97	88
E-F	53,01	14,73	75
F-G	18,34	5,09	83
G-H	42,4	11,78	78
H-I	63,73	17,70	75
I-J	62,37	17,33	80
J-K	22,31	6,20	62
K-L	28,67	7,96	56
L-M	53,27	14,80	73
M-N	56,04	15,57	76
N-O	54,95	15,27	73
O-P	33,4	9,28	66
P-Q	23,11	6,42	65
Q-R	66,53	18,48	76
R-S	29,41	8,17	53
S-T	58,19	16,17	74
T-U	65,15	18,10	82
U-V	66,19	18,39	74
V-W	315,81	87,73	201
W-Z	58,83	16,34	78
Totale	1438,31	399,56	1858

Per un confronto degli stili di guida riportiamo i profili velocità tempo delle tratte R-S, M-N e V-W ottenute dopo l'utilizzo dell'algoritmo di ottimizzazione.

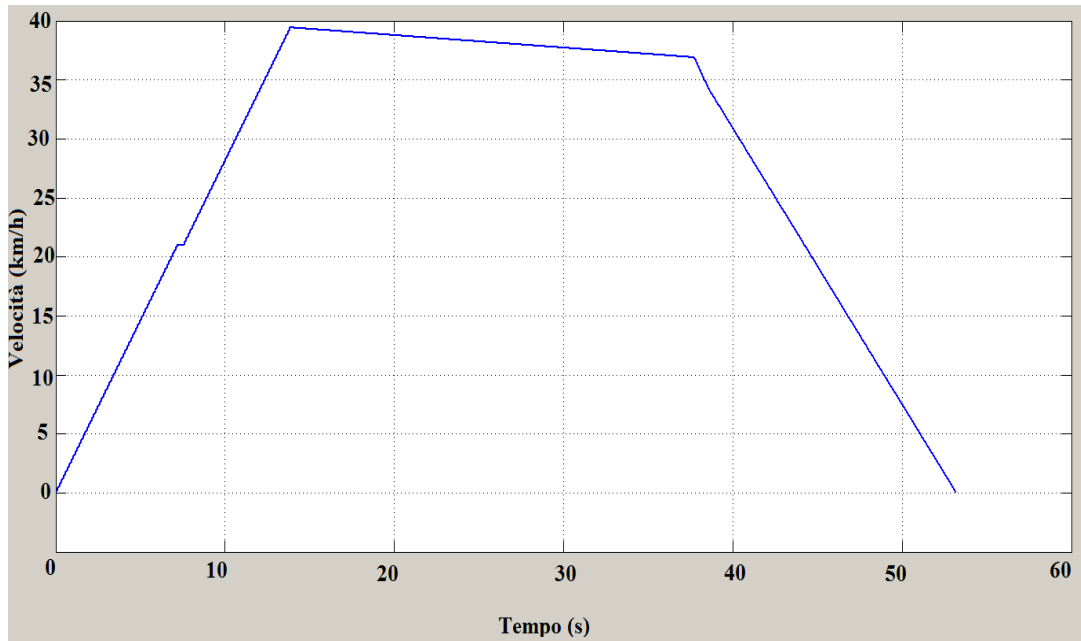


Figura 4.10 Profilo velocità tempo tratta R-S con EED

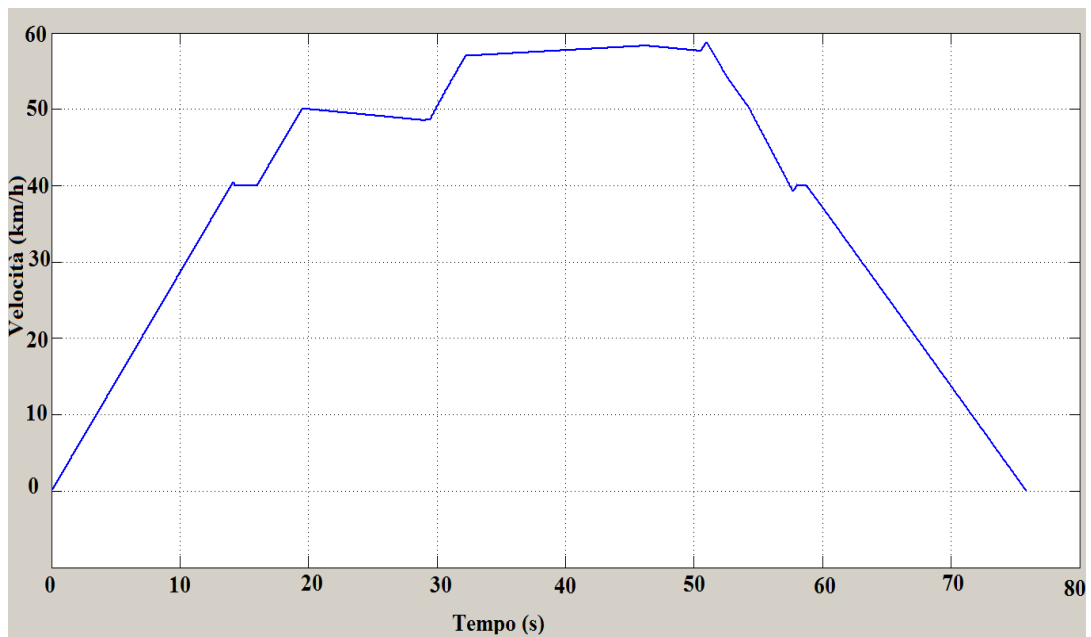


Figura 4.11 Profilo velocità tempo tratta M-N con EED

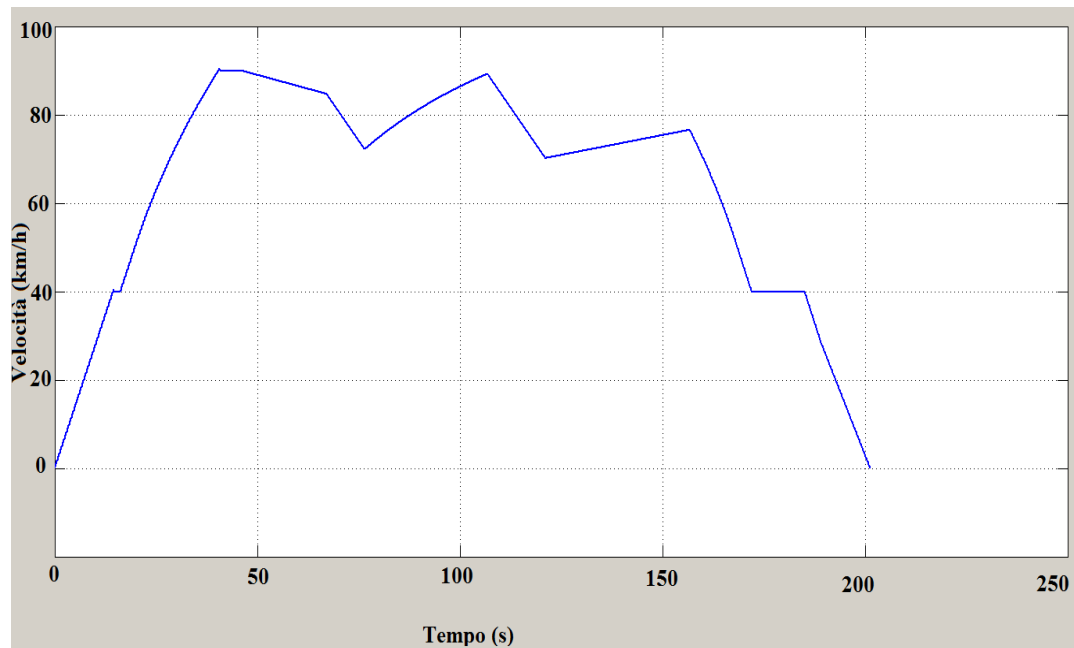


Figura 4.12 Profilo velocità tempo tratta V-W con EED

4.10 Risparmio energetico e tempi di percorrenza

Il risparmio energetico percentuale rispetto alla guida non ottimizzata viene riportato in tabella 4.7 assieme allo scostamento percentuale del tempo di percorrenza con EED rispetto al tempo di percorrenza con guida non ottimizzata e dal tempo programmato. Anche nella tabella 4.7 sono evidenziati in giallo le tratte in cui è utilizzato il fattore di ritardo con la formula (4.5).

Tabella 4.7 Risparmio energetico percentuale e ritardi percentuali

Tratta	Risparmio energetico %	Ritardo %	
		Non ottimizzato	Programmato
A-B	23,76	10,56	0,51
B-C	41,56	12,29	2,08
C-D	34,58	11,93	1,76
D-E	32,78	10,48	0,43
E-F	32,63	10,67	0,61
F-G	66,93	10,00	0,00
G-H	43,00	10,07	0,06
H-I	28,60	10,71	0,65
I-J	33,42	10,12	0,11
J-K	51,80	9,56	-0,40
K-L	45,39	10,15	0,14
L-M	29,46	12,95	2,69
M-N	30,81	10,66	0,60
N-O	37,07	10,25	0,22
O-P	46,06	9,97	-0,03
P-Q	55,13	11,16	1,05
Q-R	31,43	10,13	0,12
R-S	39,84	9,99	-0,01
S-T	29,54	10,53	0,48
T-U	31,78	10,48	0,44
U-V	30,47	9,90	-0,09
V-W	19,77	9,99	0,00
W-Z	31,07	10,51	0,46
Totale	32,89	10,57	0,51

I tempi di percorrenza variano dal 9,56% al 12,95% in più rispetto ad una guida non ottimizzata, ottenendo un aumento totale del tempo di viaggio sull'intera tratta pari al 10,57%, che equivalgono a circa 3 minuti.

Il risparmio energetico passa da un minimo del 19% nella tratta V-W, la quale presenta una lunghezza molto maggiore delle altre ed è quella che presenta una

forte pendenza positiva, ad un massimo del 66% nella tratta F-G che al contrario presenta una forte pendenza negativa e che per la quale si è dovuto ricorrere alla formulazione più stringente del fattore di penalità per i ritardi per ottenere una soluzione che non si scostasse più del 3% dal valore del tempo di percorrenza programmato.

Considerando la totalità del tracciato, a fronte di un aumento del tempo di percorrenza pari a 10,57%, si ottiene una diminuzione dell'energia consumata rispetto alla guida non ottimizzata pari al 32,89%.

L'energia totale risparmiata grazie alla tecnica di ottimizzazione vale 195,8 kWh per ogni viaggio.

Per uno studio più approfondito bisognerebbe simulare, oltre che il viaggio da A sino a Z, anche il ritorno da Z verso A, ma se consideriamo l'intera tratta il risparmio energetico medio avrà un ordine di grandezza molto simile al risultato ottenuto con il solo percorso A-Z.

4.11 Andamento del fitness e dell'energia

Per verificare che la scelta del numero di generazioni sia corretta, visualizziamo l'andamento della funzione di fitness per i tre tratti d'esempio al passare delle generazioni. Gli andamenti della funzione di fitness e dell'energia per tutte le altre tratte si possono trovare in appendice C.

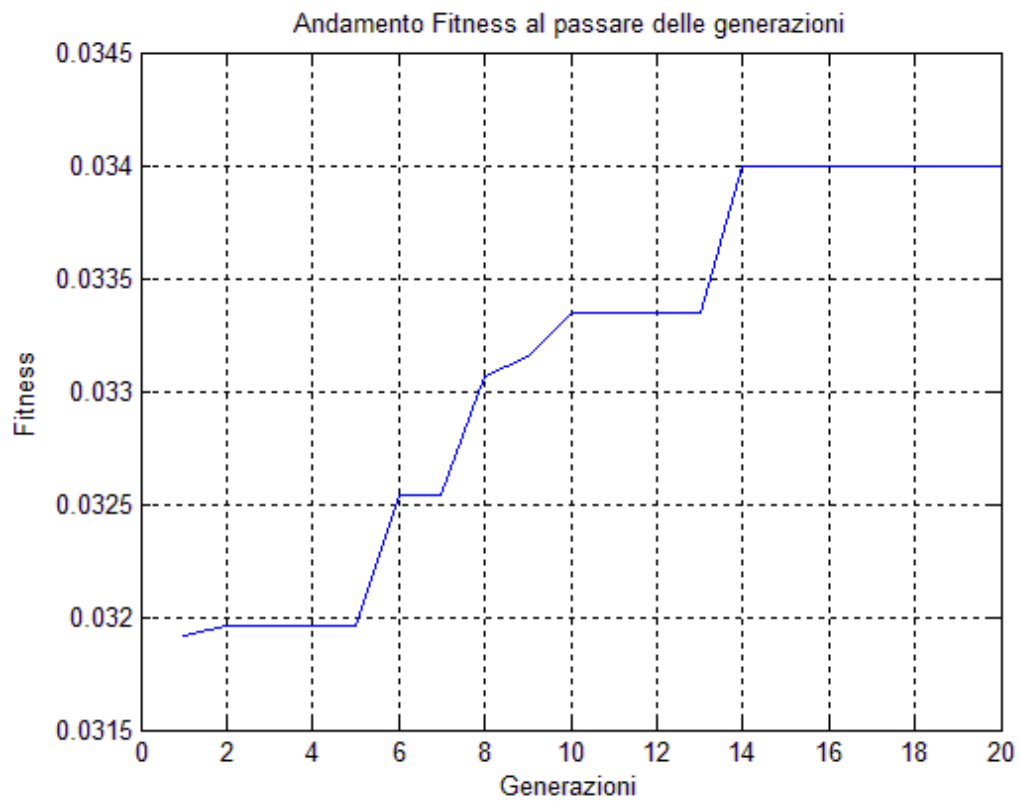


Figura 4.13 Andamento fitness tratta R-S

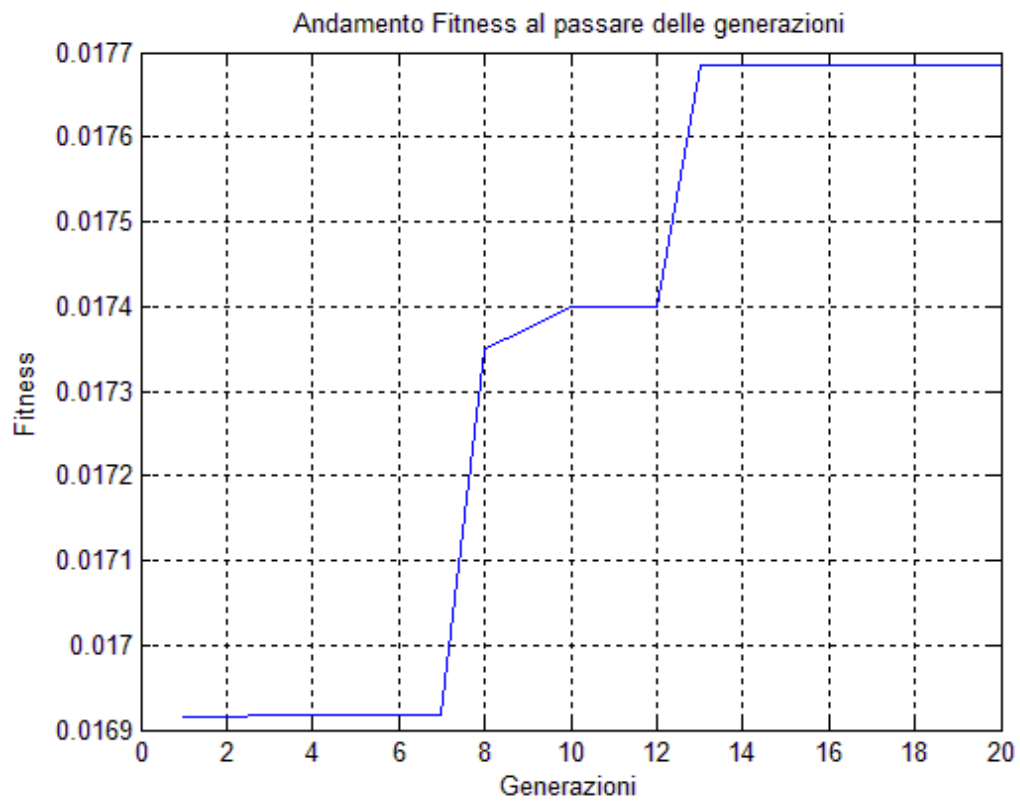


Figura 4.14 Andamento fitness tratta M-N

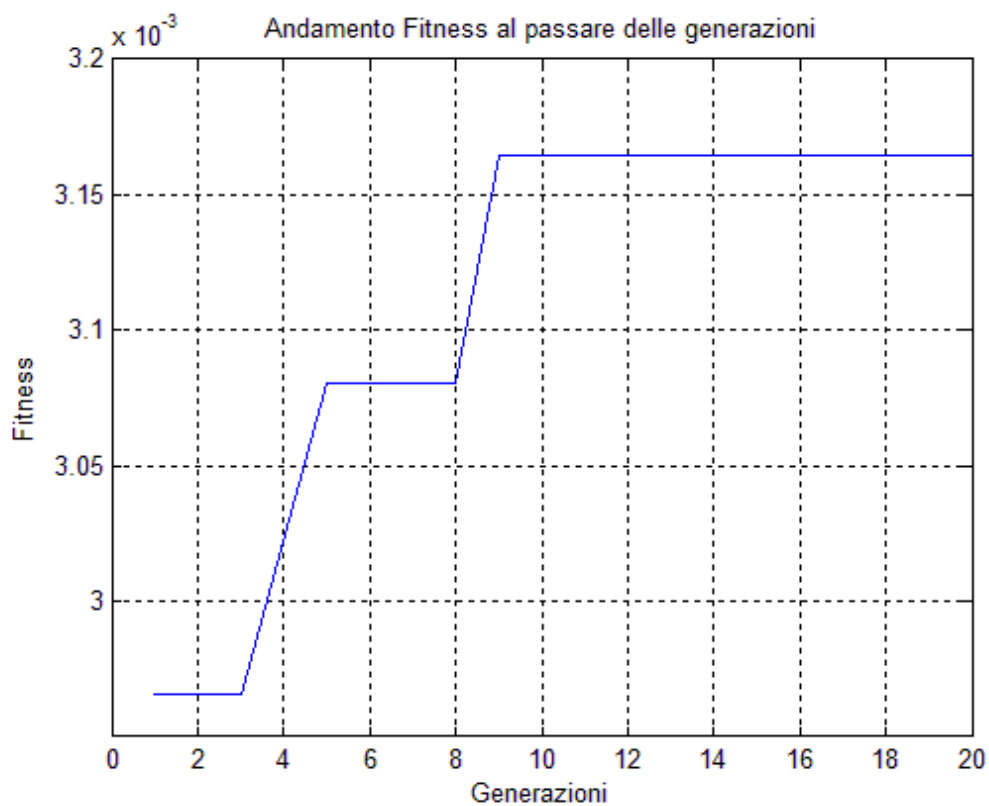


Figura 4.15 Andamento fitness tratta V-W

Come si può notare, la funzione di fitness raggiunge un valore stabile dopo circa 15 generazioni, perciò la nostra scelta di simulare 20 generazioni è un buon compromesso tra accuratezza della soluzione e velocità di calcolo della stessa.

L'andamento dell'energia, calcolata con la formula (3.2) in MJ, per le tratte considerate è mostrato nelle figure 4.16, 4.17 e 4.18.

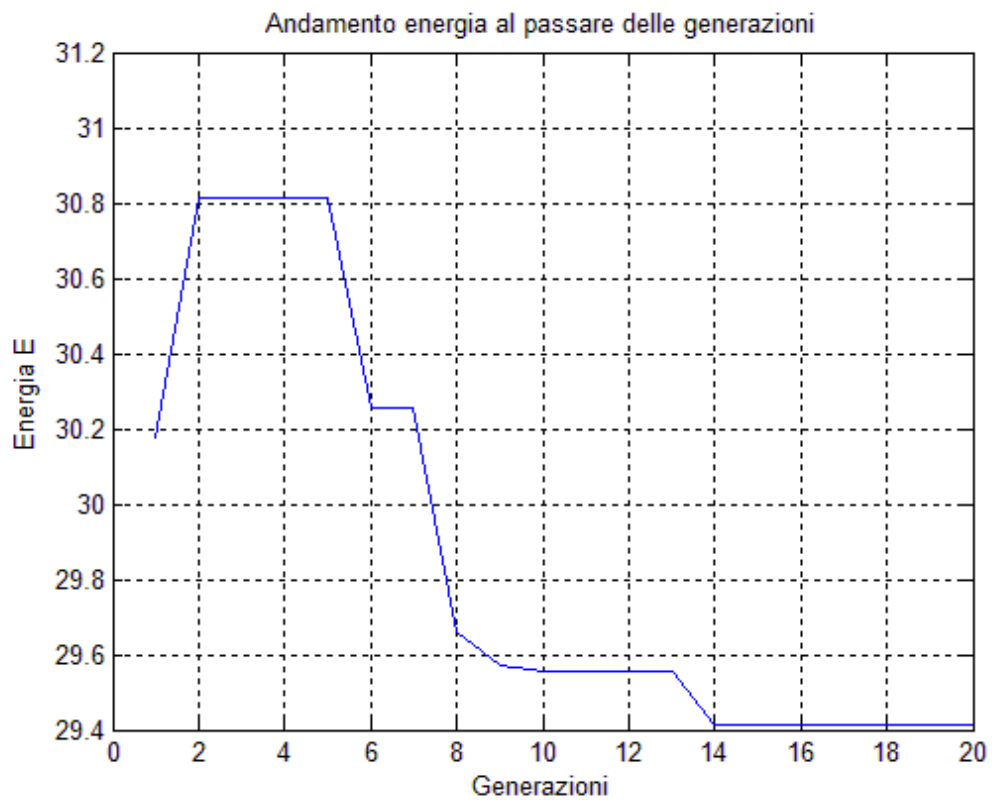


Figura 4. 16 Andamento energia tratta R-S

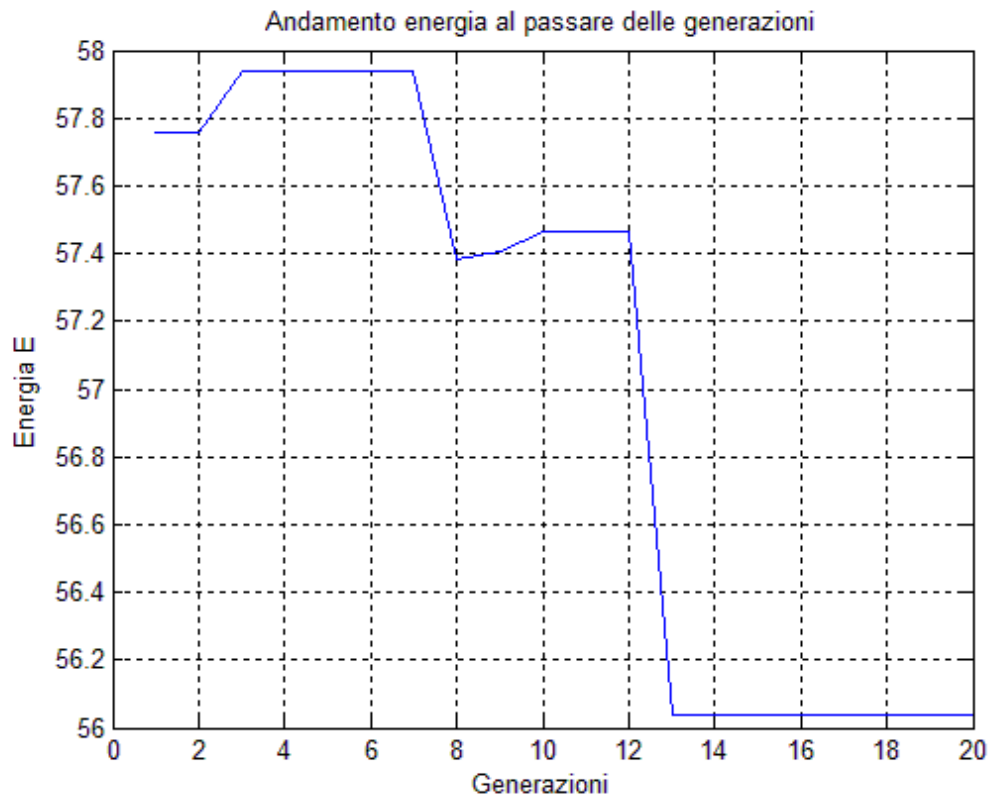


Figura 4. 17 Andamento energia tratta M-N

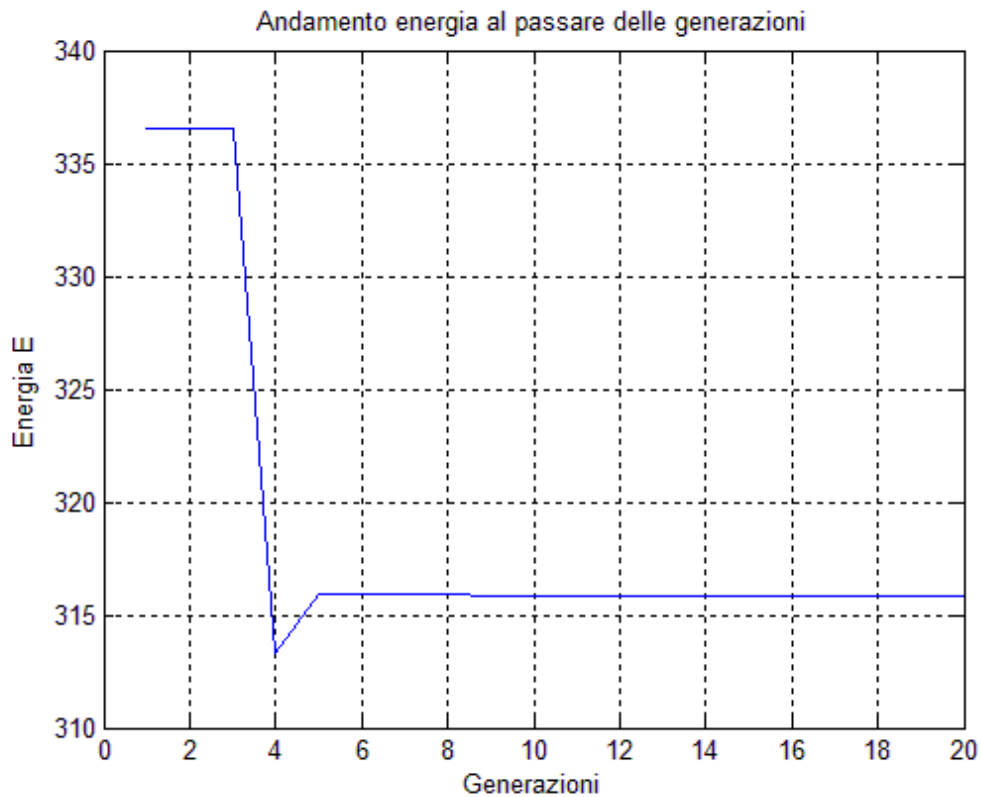


Figura 4. 18 Andamento energia tratta V-W

Come si può facilmente notare, al passare delle generazioni il consumo di energia tende a diminuire, assestandosi al valore finale dopo circa 15 generazioni.

In alcuni punti, come ad esempio tra la generazione 8 e la generazione 10 della tratta M-N (figura 4.17), l'energia consumata aumenta, in controtendenza rispetto alla funzione di fitness. Questo accade perché la soluzione trovata nella generazione 10 ha sì un consumo di energia maggiore di quella della generazione 8, ma avrà un tempo di percorrenza che si scosta di meno dal tempo programmato, portando ad un aumento complessivo del fitness.

Conclusioni

In questo lavoro si è cercato di mostrare le potenzialità delle tecniche di ottimizzazione basate sull'utilizzo degli algoritmi genetici, sviluppandone una fra quelle già presenti in letteratura e testandola su un esempio di linea metropolitana.

Le prestazioni della tecnica di ottimizzazione presentata sono molto soddisfacenti, in quanto permettono di risparmiare una fetta di energia pari al 32,89%. La durata del tempo di viaggio viene aumentata del 10,57% rispetto alla guida non ottimizzata, ovvero quella che permette i tempi di percorrenza più brevi. Rispetto al tempo di viaggio programmato l'aumento è solo dello 0,51% in più.

I risultati ottenuti sono in linea con quelli proposti da altre tecniche di ottimizzazione sviluppate in letteratura, vedi articoli [10], [11] e [12].

L'utilizzo degli algoritmi genetici permette di raggiungere ottimi risultati nei problemi di ottimizzazione anche con pochi dati a disposizione, permettendo la riprogrammazione dei comandi in tempi brevi a fronte di eventi imprevisti o di modifiche dei parametri di treni e linea.

Gli scostamenti temporali delle soluzioni trovate, rispetto al tempo di viaggio programmato, sono tutti sotto la soglia del 3%. Questo valore rende praticamente trascurabile il ritardo intrinsecamente accumulato, perché è di grandezza confrontabile con i ritardi che possono verificarsi a causa di eventi non predicibili, quali l'aumento del tempo di sosta in stazione a causa del sovraffollamento o per oggetti bloccati temporaneamente nelle porte. In alternativa, se le soluzioni non concordano con le scelte strategiche in atto, è possibile, come mostrato nel caso studio, irrigidire i vincoli di tempo, senza dover abbandonare o modificare la struttura dell'algoritmo.

Impostando l'orario dei treni sui risultati ottenuti grazie gli algoritmi genetici, è possibile ottenere treni in orario nella quasi totalità dei casi anche dovendo riprogrammare la serie di comandi. Infatti anche la nuova soluzione rispetterà il tempo di viaggio impostato, senza perdere il criterio fondamentale dell'efficienza energetica. In caso di un ritardo marcato per cause di forza maggiore, si ha poi la possibilità di poterlo recuperare sfruttando il margine del 10%.

Questi accorgimenti, se attuati in una metropolitana automatica, dove i comandi di trazione, frenatura e marcia d'inerzia, devono essere già impartiti all'ATO del

treno automatico, portano un sostanziale risparmio quasi a costo zero, poichè non sono necessari investimenti per infrastrutture o componenti aggiuntivi.

Si possono ben immaginare i benefici ottenuti in termini economici e ambientali derivanti dall'utilizzo di una buona ottimizzazione energetica, se si considera che la tecnica proposta e sviluppata, anche se basilare, permette di risparmiare per ogni viaggio effettuato da un treno, un'energia pari a 195,8 kWh.

Risulta evidente che, dato il gran numero di viaggi effettuati ogni giorno in una metropolitana, magari composta da più linee, anche il risparmio di una minima quantità di energia in ognuno di questi viaggi, migliora notevolmente l'efficienza energetica dell'intero sistema.

Gli algoritmi genetici, per loro natura, rendono difficile replicare esattamente i risultati ottenuti in lavori precedenti, in quanto la soluzione viene ottenuta mediante ripetuti tentativi. Questo può essere considerato un deficit dei metodi basati sugli algoritmi genetici, in quanto ad ogni ricerca della soluzione migliore ne viene restituita una simile ma comunque diversa ogni volta, anche impostando le stesse condizioni iniziali. Sta poi a chi utilizza queste soluzioni, decidere se la prestazione ottenuta sia in linea con i requisiti prefissati.

C'è da ricordare che in situazioni reali, la guida non ottimizzata, presa come riferimento, non viene normalmente impostata all'ATO come stile di guida, se non in situazioni particolari, tipicamente durante il recupero di un ritardo, dove il raggiungimento dell'efficienza energetica può passare in secondo piano. Nell'articolo [10] il profilo di guida ottenuto mediante l'utilizzo degli algoritmi genetici viene confrontato con un profilo che rievoca lo stile di guida medio tenuto dai macchinisti di una linea tramviaria. Anche se non viene ottenuto un risparmio energetico così marcato come nel confronto con la guida non ottimizzata, si raggiunge comunque un risparmio energetico percentuale del 7%, confermando ancora una volta le potenzialità del metodo.

Nomenclatura e lista degli acronimi

UdT	Unità di trazione
α	Angolo di inclinazione piano inclinato
β	Elasticità di funzionamento
η_i	Rendimento degli ingranaggi
η_t	Rendimento totale motore e ingranaggi
AT	Alta tensione
c.c.	Corrente continua
SSE	Sottostazione elettrica
PCC	Punto di comando e controllo
VAL	Veicolo automatico leggero
ATC	Automatic train control
ATO	Automatic train operation
ATP	Automatic train protection
ATS	Automatic train supervision
DSP	Dynamic speed profile
SSP	Static speed profile
EED	Energy efficient driving
ρ	Indice di puntualità
η_M	Rendimento complessivo in trazione
η_B	Rendimento complessivo in frenatura

APPENDICE A - Codice MATLAB

Codice principale

```
%carico dati preliminari
Dati_cromosomi2;
Dati_veicolo;

% creaziome primi genitori
genitori

for i=1:iterazioni
    %creazione cromosomi genitori
    Genitore1=creazione_cromosoma(tabellaG1,bit,geni,maxL);
    Genitore2=creazione_cromosoma(tabellaG2,bit,geni,maxL);
    %cromosomi figli 1 2
    cr1=riproduzione(Genitore1,Genitore2,geni);
    cr2=riproduzione(Genitore1,Genitore2,geni);
    [cr1,cr2]=crossover(cr1,cr2,geni,bit);
    cr1=mutazione(cr1,geni,bit);
    cr2=mutazione(cr2,geni,bit);
    cr1=riordino(cr1,geni);
    cr2=riordino(cr2,geni);
    %cromosomi figli 3 4
    cr3=riproduzione(Genitore1,Genitore2,geni);
    cr4=riproduzione(Genitore1,Genitore2,geni);
    [cr3,cr4]=crossover(cr3,cr4,geni,bit);
    cr3=mutazione(cr3,geni,bit);
    cr4=mutazione(cr4,geni,bit);
    cr3=riordino(cr3,geni);
    cr4=riordino(cr4,geni);
    %cromosomi figli 5 e 6
    cr5=riproduzione(Genitore1,Genitore2,geni);
    cr6=riproduzione(Genitore1,Genitore2,geni);
    [cr5,cr6]=crossover(cr5,cr6,geni,bit);
    cr5=mutazione(cr5,geni,bit);
    cr6=mutazione(cr6,geni,bit);
    cr5=riordino(cr5,geni);
    cr6=riordino(cr6,geni);
    %cromosomi 7 e 8
    cr7=riproduzione(Genitore1,Genitore2,geni);
    cr8=riproduzione(Genitore1,Genitore2,geni);
    [cr7,cr8]=crossover(cr7,cr8,geni,bit);
    cr7=mutazione(cr7,geni,bit);
    cr8=mutazione(cr8,geni,bit);
    cr7=riordino(cr7,geni);
    cr8=riordino(cr8,geni);
    %creazione tabelle di controllo
    tabella1=creazione_tabella(cr1,bit,geni,maxL);
    tabella2=creazione_tabella(cr2,bit,geni,maxL);
```

```
tabella3=creazione_tabella(cr3,bit,geni,maxL);
tabella4=creazione_tabella(cr4,bit,geni,maxL);
tabella5=creazione_tabella(cr5,bit,geni,maxL);
tabella6=creazione_tabella(cr6,bit,geni,maxL);
tabella7=creazione_tabella(cr7,bit,geni,maxL);
tabella8=creazione_tabella(cr8,bit,geni,maxL);

    %controllo per evitare coasting a metri zero
if tabella1(1)==0
    tabella1(1)=1;
end
if tabella2(1)==0
    tabella2(1)=1;
end
if tabella3(1)==0
    tabella3(1)=1;
end
if tabella4(1)==0
    tabella4(1)=1;
end
if tabella5(1)==0
    tabella5(1)=1;
end
if tabella6(1)==0
    tabella6(1)=1;
end
if tabella7(1)==0
    tabella7(1)=1;
end
if tabella8(1)==0
    tabella8(1)=1;
end

%simulazione tabella 1
C1=tabella1(1); %comando coasting 1
T2=tabella1(2); %comando trazione 2
C3=tabella1(3); %comando coasting 3
F=tabella1(4); %comando frenatura

sim('modelloprova'); %esecuzione simulatore
Energia1=Energia;
tempo1=tempo;
S1=spazio;

%simulazione tabella 2
C1=tabella2(1);
T2=tabella2(2);
C3=tabella2(3);
F=tabella2(4);
```

```

sim('modelloprova');
Energia2=Energia;
tempo2=tempo;
S2=spazio;

%simulazione tabella 3
C1=tabella3(1);
T2=tabella3(2);
C3=tabella3(3);
F=tabella3(4);

sim('modelloprova');
Energia3=Energia;
tempo3=tempo;
S3=spazio;

%simulazione tabella 4
C1=tabella4(1);
T2=tabella4(2);
C3=tabella4(3);
F=tabella4(4);

sim('modelloprova');
Energia4=Energia;
tempo4=tempo;
S4=spazio;

%simulazione tabella 5
C1=tabella5(1);
T2=tabella5(2);
C3=tabella5(3);
F=tabella5(4);

sim('modelloprova');
Energia5=Energia;
tempo5=tempo;
S5=spazio;

%simulazione tabella6
C1=tabella6(1);
T2=tabella6(2);
C3=tabella6(3);
F=tabella6(4);

sim('modelloprova');
Energia6=Energia;
tempo6=tempo;
S6=spazio;

```

```
%simulazione tabella7
C1=tabella7(1);
T2=tabella7(2);
C3=tabella7(3);
F=tabella7(4);

sim('modelloprova');
Energia7=Energia;
tempo7=tempo;
S7=spazio;

%simulazione tabella8
C1=tabella8(1);
T2=tabella8(2);
C3=tabella8(3);
F=tabella8(4);

sim('modelloprova');
Energia8=Energia;
tempo8=tempo;
S8=spazio;

%valutazione del fitness
Fr1=fattoreritardi(t_programmato,tempo1); %valutazione fattore
ritardi
Fitness1=fitness(Energia1,Fr1); %valutazione fitness
Fr2=fattoreritardi(t_programmato,tempo2);
Fitness2=fitness(Energia2,Fr2);
Fr3=fattoreritardi(t_programmato,tempo3);
Fitness3=fitness(Energia3,Fr3);
Fr4=fattoreritardi(t_programmato,tempo4);
Fitness4=fitness(Energia4,Fr4);
Fr5=fattoreritardi(t_programmato,tempo5);
Fitness5=fitness(Energia5,Fr5);
Fr6=fattoreritardi(t_programmato,tempo6);
Fitness6=fitness(Energia6,Fr6);
Fr7=fattoreritardi(t_programmato,tempo7);
Fitness7=fitness(Energia7,Fr7);
Fr8=fattoreritardi(t_programmato,tempo8);
Fitness8=fitness(Energia8,Fr8);

%controllo spazio percorso
if or(S1>maxL+1.1,S1<maxL-1.1)
    Fitness1=Fitness1/100;
end
if or(S2>maxL+1.1,S2<maxL-1.1)
    Fitness2=Fitness2/100;
end
if or(S3>maxL+1.1,S3<maxL-1.1)
    Fitness3=Fitness3/100;
```



```

end
if or(S4>maxL+1.1,S4<maxL-1.1)
    Fitness4=Fitness4/100;
end
if or(S5>maxL+1.1,S5<maxL-1.1)
    Fitness5=Fitness5/100;
end
if or(S6>maxL+1.1,S6<maxL-1.1)
    Fitness6=Fitness6/100;
end
if or(S7>maxL+1.1,S7<maxL-1.1)
    Fitness7=Fitness7/100;
end
if or(S8>maxL+1.1,S8<maxL-1.1)
    Fitness8=Fitness8/100;
end

%valutazione del miglior cromosoma
Classifica=[FitnessG1 -1;FitnessG2 -1; Fitness1 1; Fitness2 2;
Fitness3 3; Fitness4 4;Fitness5 5;Fitness6 6;Fitness7 7;Fitness8
8];

[Fittest1,Fittest2]=fittest3(Classifica);

switch Fittest1
    case 1
        tabellaG1=tabella1;
        FitnessG1=Fitness1;
        EnergiaG1=Energia1;
    case 2
        tabellaG1=tabella2;
        FitnessG1=Fitness2;
        EnergiaG1=Energia2;
    case 3
        tabellaG1=tabella3;
        FitnessG1=Fitness3;
        Andam=FitnessG1;
        EnergiaG1=Energia3;
    case 4
        tabellaG1=tabella4;
        FitnessG1=Fitness4;
        EnergiaG1=Energia4;
    case 5
        tabellaG1=tabella5;
        FitnessG1=Fitness5;
        EnergiaG1=Energia5;
    case 6
        tabellaG1=tabella6;
        FitnessG1=Fitness6;
        EnergiaG1=Energia6;

```

```
        case 7
            tabellaG1=tabella7;
            FitnessG1=Fitness7;
            EnergiaG1=Energia7;
        case 8
            tabellaG1=tabella8;
            FitnessG1=Fitness8;
            EnergiaG1=Energia8;
    end

    switch Fittest2
        case 1
            tabellaG2=tabella1;
            FitnessG2=Fitness1;
        case 2
            tabellaG2=tabella2;
            FitnessG2=Fitness2;
        case 3
            tabellaG2=tabella3;
            FitnessG2=Fitness3;
        case 4
            tabellaG2=tabella4;
            FitnessG2=Fitness4;
        case 5
            tabellaG2=tabella5;
            FitnessG2=Fitness5;
        case 6
            tabellaG2=tabella6;
            FitnessG2=Fitness6;
        case 7
            tabellaG2=tabella7;
            FitnessG2=Fitness7;
        case 8
            tabellaG2=tabella8;
            FitnessG2=Fitness8;
    end

    andamentoE(i)=EnergiaG1;
    andamentoF(i)=FitnessG1/100;

    i
end

figure;
plot(andamentoE)
xlabel('Generazioni')
ylabel('Energia E')
grid on;
title('Andamento energia al passare delle generazioni');
```

```
figure;
plot (andamentoF)
xlabel ('Generazioni')
ylabel ('Fitness')
grid on;
title ('Andamento Fitness al passare delle generazioni');

beep
```

Codice “Dati_cromosomi2”-Impostazioni iniziali

```
clc
clear
close all

bit=10;
geni=4;
iterazioni=20;
t_flatout=;
global maxL t_programmato;
maxL=;
t_programmato=1.1*t_flatout;
```

Codice “Dati veicolo”-Impostazioni del veicolo

```
global me Pmax Paux;
m_veicolo=295; %massa veicolo in tonnellate
me=m_veicolo*(1+0.06+0.15); %massa equivalente 0.15 m massa
passaggeri
Pmax= 5000; %potenza elettrica veicolo kW
Paux=235; %potenza ausiliari in kW

global C1 T2 C3 F;
```

Codice “genitori”- Creazione primi due genitori

```
%creazione tabelle random
tabG1=tabellarandom(maxL,geni);
tabG2=tabellarandom(maxL,geni);
tabG3=tabellarandom(maxL,geni);
tabG4=tabellarandom(maxL,geni);
tabG5=tabellarandom(maxL,geni);
tabG6=tabellarandom(maxL,geni);
```

```
tabG7=tabellarandom(maxL,geni);
tabG8=tabellarandom(maxL,geni);
tabG9=tabellarandom(maxL,geni);
tabG10=tabellarandom(maxL,geni);
tabG11=tabellarandom(maxL,geni);
tabG12=tabellarandom(maxL,geni);
tabG13=tabellarandom(maxL,geni);
tabG14=tabellarandom(maxL,geni);
tabG15=tabellarandom(maxL,geni);
tabG16=tabellarandom(maxL,geni);

%creazione geni e riordino

G1=creazione_cromosoma(tabG1,bit,geni,maxL);
G1=riordino(G1,geni);
G2=creazione_cromosoma(tabG2,bit,geni,maxL);
G2=riordino(G2,geni);
G3=creazione_cromosoma(tabG3,bit,geni,maxL);
G3=riordino(G3,geni);
G4=creazione_cromosoma(tabG4,bit,geni,maxL);
G4=riordino(G4,geni);
G5=creazione_cromosoma(tabG5,bit,geni,maxL);
G5=riordino(G5,geni);
G6=creazione_cromosoma(tabG6,bit,geni,maxL);
G6=riordino(G6,geni);
G7=creazione_cromosoma(tabG7,bit,geni,maxL);
G7=riordino(G7,geni);
G8=creazione_cromosoma(tabG8,bit,geni,maxL);
G8=riordino(G8,geni);
G9=creazione_cromosoma(tabG9,bit,geni,maxL);
G9=riordino(G9,geni);
G10=creazione_cromosoma(tabG10,bit,geni,maxL);
G10=riordino(G10,geni);
G11=creazione_cromosoma(tabG11,bit,geni,maxL);
G11=riordino(G11,geni);
G12=creazione_cromosoma(tabG12,bit,geni,maxL);
G12=riordino(G12,geni);
G13=creazione_cromosoma(tabG13,bit,geni,maxL);
G13=riordino(G13,geni);
G14=creazione_cromosoma(tabG14,bit,geni,maxL);
G14=riordino(G14,geni);
G15=creazione_cromosoma(tabG15,bit,geni,maxL);
G15=riordino(G15,geni);
G16=creazione_cromosoma(tabG16,bit,geni,maxL);
G16=riordino(G16,geni);

%creazione tabelle
tabellaG1=creazione_tabella(G1,bit,geni,maxL);
tabellaG2=creazione_tabella(G2,bit,geni,maxL);
```

```

tabellaG3=creazione_tabella(G3,bit,geni,maxL);
tabellaG4=creazione_tabella(G4,bit,geni,maxL);
tabellaG5=creazione_tabella(G5,bit,geni,maxL);
tabellaG6=creazione_tabella(G6,bit,geni,maxL);
tabellaG7=creazione_tabella(G7,bit,geni,maxL);
tabellaG8=creazione_tabella(G8,bit,geni,maxL);
tabellaG9=creazione_tabella(G9,bit,geni,maxL);
tabellaG10=creazione_tabella(G10,bit,geni,maxL);
tabellaG11=creazione_tabella(G11,bit,geni,maxL);
tabellaG12=creazione_tabella(G12,bit,geni,maxL);
tabellaG13=creazione_tabella(G13,bit,geni,maxL);
tabellaG14=creazione_tabella(G14,bit,geni,maxL);
tabellaG15=creazione_tabella(G15,bit,geni,maxL);
tabellaG16=creazione_tabella(G16,bit,geni,maxL);

```

```
%simulazione genitori
```

```

C1=tabellaG1(1);
T2=tabellaG1(2);
C3=tabellaG1(3);
F=tabellaG1(4);

```

```

sim('modelloprova');
EnergiaG1=Energia;
tempoG1=tempo;
SG1=spazio;
FrG1=fattoreritardi(t_programmato,tempoG1);
FitnessG1=fitness(EnergiaG1,FrG1);

```

```

C1=tabellaG2(1);
T2=tabellaG2(2);
C3=tabellaG2(3);
F=tabellaG2(4);

```

```

sim('modelloprova');
EnergiaG2=Energia;
tempoG2=tempo;
SG2=spazio;
FrG2=fattoreritardi(t_programmato,tempoG2);
FitnessG2=fitness(EnergiaG2,FrG2);

```

```

C1=tabellaG3(1);
T2=tabellaG3(2);
C3=tabellaG3(3);
F=tabellaG3(4);

```

```

sim('modelloprova');
EnergiaG3=Energia;
tempoG3=tempo;

```

```
SG3=spazio;  
FrG3=fattoreritardi (t_programmato,tempoG3);  
FitnessG3=fitness (EnergiaG3,FrG3);
```

```
C1=tabellaG4 (1);  
T2=tabellaG4 (2);  
C3=tabellaG4 (3);  
F=tabellaG4 (4);
```

```
sim ('modelloprova');  
EnergiaG4=Energia;  
tempoG4=tempo;  
SG4=spazio;  
FrG4=fattoreritardi (t_programmato,tempoG4);  
FitnessG4=fitness (EnergiaG4,FrG4);
```

```
C1=tabellaG5 (1);  
T2=tabellaG5 (2);  
C3=tabellaG5 (3);  
F=tabellaG5 (4);
```

```
sim ('modelloprova');  
EnergiaG5=Energia;  
tempoG5=tempo;  
SG5=spazio;  
FrG5=fattoreritardi (t_programmato,tempoG5);  
FitnessG5=fitness (EnergiaG5,FrG5);
```

```
C1=tabellaG6 (1);  
T2=tabellaG6 (2);  
C3=tabellaG6 (3);  
F=tabellaG6 (4);
```

```
sim ('modelloprova');  
EnergiaG6=Energia;  
tempoG6=tempo;  
SG6=spazio;  
FrG6=fattoreritardi (t_programmato,tempoG6);  
FitnessG6=fitness (EnergiaG6,FrG6);
```

```
C1=tabellaG7 (1);  
T2=tabellaG7 (2);  
C3=tabellaG7 (3);  
F=tabellaG7 (4);
```

```
sim ('modelloprova');  
EnergiaG7=Energia;  
tempoG7=tempo;  
SG7=spazio;
```

```

FrG7=fattoreritardi (t_programmato,tempoG7);
FitnessG7=fitness (EnergiaG7,FrG7);

C1=tabellaG8 (1);
T2=tabellaG8 (2);
C3=tabellaG8 (3);
F=tabellaG8 (4);

sim ('modelloprova');
EnergiaG8=Energia;
tempoG8=tempo;
SG8=spazio;
FrG8=fattoreritardi (t_programmato,tempoG8);
FitnessG8=fitness (EnergiaG8,FrG8);

C1=tabellaG9 (1);
T2=tabellaG9 (2);
C3=tabellaG9 (3);
F=tabellaG9 (4);

sim ('modelloprova');
EnergiaG9=Energia;
tempoG9=tempo;
SG9=spazio;
FrG9=fattoreritardi (t_programmato,tempoG9);
FitnessG9=fitness (EnergiaG9,FrG9);

C1=tabellaG10 (1);
T2=tabellaG10 (2);
C3=tabellaG10 (3);
F=tabellaG10 (4);

sim ('modelloprova');
EnergiaG10=Energia;
tempoG10=tempo;
SG10=spazio;
FrG10=fattoreritardi (t_programmato,tempoG10);
FitnessG10=fitness (EnergiaG10,FrG10);

C1=tabellaG11 (1);
T2=tabellaG11 (2);
C3=tabellaG11 (3);
F=tabellaG11 (4);

sim ('modelloprova');
EnergiaG11=Energia;
tempoG11=tempo;
SG11=spazio;
FrG11=fattoreritardi (t_programmato,tempoG11);

```

```
FitnessG11=fitness(EnergiaG11,FrG1);

C1=tabellaG12(1);
T2=tabellaG12(2);
C3=tabellaG12(3);
F=tabellaG12(4);

sim('modelloprova');
EnergiaG12=Energia;
tempoG12=tempo;
SG12=spazio;
FrG12=fattoreritardi(t_programmato,tempoG12);
FitnessG12=fitness(EnergiaG12,FrG12);

C1=tabellaG13(1);
T2=tabellaG13(2);
C3=tabellaG13(3);
F=tabellaG13(4);

sim('modelloprova');
EnergiaG13=Energia;
tempoG13=tempo;
SG13=spazio;
FrG13=fattoreritardi(t_programmato,tempoG13);
FitnessG13=fitness(EnergiaG13,FrG13);

C1=tabellaG14(1);
T2=tabellaG14(2);
C3=tabellaG14(3);
F=tabellaG14(4);

sim('modelloprova');
EnergiaG14=Energia;
tempoG14=tempo;
SG14=spazio;
FrG14=fattoreritardi(t_programmato,tempoG14);
FitnessG14=fitness(EnergiaG14,FrG14);

C1=tabellaG15(1);
T2=tabellaG15(2);
C3=tabellaG15(3);
F=tabellaG15(4);

sim('modelloprova');
EnergiaG15=Energia;
tempoG15=tempo;
SG15=spazio;
FrG15=fattoreritardi(t_programmato,tempoG15);
FitnessG15=fitness(EnergiaG15,FrG15);
```



```

C1=tabellaG16(1);
T2=tabellaG16(2);
C3=tabellaG16(3);
F=tabellaG16(4);

sim('modelloprova');
EnergiaG16=Energia;
tempoG16=tempo;
SG16=spazio;
FrG16=fattoreritardi(t_programmato,tempoG16);
FitnessG16=fitness(EnergiaG16,FrG16);

%controllo spazio fermata
if or(SG1>maxL+1.1,SG1<maxL-1.1)
    FitnessG1=FitnessG1/100;
end
if or(SG2>maxL+1.1,SG2<maxL-1.1)
    FitnessG2=FitnessG2/100;
end
if or(SG3>maxL+1.1,SG3<maxL-1.1)
    FitnessG3=FitnessG3/100;
end
if or(SG5>maxL+1.1,SG5<maxL-1.1)
    FitnessG5=FitnessG5/100;
end
if or(SG6>maxL+1.1,SG6<maxL-1.1)
    FitnessG6=FitnessG6/100;
end
if or(SG7>maxL+1.1,SG7<maxL-1.1)
    FitnessG7=FitnessG7/100;
end
if or(SG8>maxL+1.1,SG8<maxL-1.1)
    FitnessG8=FitnessG8/100;
end
if or(SG9>maxL+1.1,SG9<maxL-1.1)
    FitnessG9=FitnessG9/100;
end
if or(SG10>maxL+1.1,SG10<maxL-1.1)
    FitnessG10=FitnessG10/100;
end
if or(SG11>maxL+1.1,SG11<maxL-1.1)
    FitnessG11=FitnessG11/100;
end
if or(SG12>maxL+1.1,SG12<maxL-1.1)
    FitnessG12=FitnessG12/100;
end
if or(SG13>maxL+1.1,SG13<maxL-1.1)
    FitnessG13=FitnessG13/100;
end
end

```

```
if or(SG14>maxL+1.1,SG14<maxL-1.1)
    FitnessG14=FitnessG14/100;
end
if or(SG15>maxL+1.1,SG15<maxL-1.1)
    FitnessG15=FitnessG15/100;
end
if or(SG16>maxL+1.1,SG16<maxL-1.1)
    FitnessG16=FitnessG16/100;
end

%selezione dei 2 genitori

ClassificaG=[FitnessG1 1;FitnessG2 2; FitnessG3 3; FitnessG4 4;
FitnessG5 5; FitnessG6 6;FitnessG7 7; FitnessG8 8; FitnessG9 9;
FitnessG10 10; FitnessG11 11; FitnessG12 12; FitnessG13 13; Fit-
nessG14 14; FitnessG15 15; FitnessG16 16];

[Fittest1,Fittest2]=fittest2(ClassificaG);

switch Fittest1
    case 1

    case 2
        tabellaG1=tabellaG2;
        FitnessG1=FitnessG2;
        EnergiaG1=EnergiaG2;
    case 3
        tabellaG1=tabellaG3;
        FitnessG1=FitnessG3;
        EnergiaG1=EnergiaG3;
    case 4
        tabellaG1=tabellaG4;
        FitnessG1=FitnessG4;
        EnergiaG1=EnergiaG4;
    case 5
        tabellaG1=tabellaG5;
        FitnessG1=FitnessG5;
        EnergiaG1=EnergiaG5;
    case 6
        tabellaG1=tabellaG6;
        FitnessG1=FitnessG6;
        EnergiaG1=EnergiaG6;
    case 7
        tabellaG1=tabellaG7;
        FitnessG1=FitnessG7;
        EnergiaG1=EnergiaG7;
    case 8
        tabellaG1=tabellaG8;
        FitnessG1=FitnessG8;
        EnergiaG1=EnergiaG8;
```

```
case 9
    tabellaG1=tabellaG9;
    FitnessG1=FitnessG9;
    EnergiaG1=EnergiaG9;
case 10
    tabellaG1=tabellaG10;
    FitnessG1=FitnessG10;
    EnergiaG1=EnergiaG10;
case 11
    tabellaG1=tabellaG11;
    FitnessG1=FitnessG11;
    EnergiaG1=EnergiaG11;
case 12
    tabellaG1=tabellaG12;
    FitnessG1=FitnessG12;
    EnergiaG1=EnergiaG12;
case 13
    tabellaG1=tabellaG13;
    FitnessG1=FitnessG13;
    EnergiaG1=EnergiaG13;
case 14
    tabellaG1=tabellaG14;
    FitnessG1=FitnessG14;
    EnergiaG1=EnergiaG14;
case 15
    tabellaG1=tabellaG15;
    FitnessG1=FitnessG15;
    EnergiaG1=EnergiaG15;
case 16
    tabellaG1=tabellaG16;
    FitnessG1=FitnessG16;
    EnergiaG1=EnergiaG16;
end

switch Fittest2
case 1
    tabellaG2=tabellaG1;
    FitnessG2=FitnessG1;
    EnergiaG2=EnergiaG1;
case 2

case 3
    tabellaG2=tabellaG3;
    FitnessG2=FitnessG3;
    EnergiaG2=EnergiaG3;
case 4
    tabellaG2=tabellaG4;
    FitnessG2=FitnessG4;
    EnergiaG2=EnergiaG4;
case 5
```

```
        tabellaG2=tabellaG5;
        FitnessG2=FitnessG5;
        EnergiaG2=EnergiaG5;
case 6
        tabellaG2=tabellaG6;
        FitnessG2=FitnessG6;
        EnergiaG2=EnergiaG6;
case 7
        tabellaG2=tabellaG7;
        FitnessG2=FitnessG7;
        EnergiaG2=EnergiaG7;
case 8
        tabellaG2=tabellaG8;
        FitnessG2=FitnessG8;
        EnergiaG2=EnergiaG8;
case 9
        tabellaG2=tabellaG9;
        FitnessG2=FitnessG9;
        EnergiaG2=EnergiaG9;
case 10
        tabellaG2=tabellaG10;
        FitnessG2=FitnessG10;
        EnergiaG2=EnergiaG10;
case 11
        tabellaG2=tabellaG11;
        FitnessG2=FitnessG11;
        EnergiaG2=EnergiaG11;
case 12
        tabellaG2=tabellaG12;
        FitnessG2=FitnessG12;
        EnergiaG2=EnergiaG12;
case 13
        tabellaG2=tabellaG13;
        FitnessG2=FitnessG13;
        EnergiaG2=EnergiaG13;
case 14
        tabellaG2=tabellaG14;
        FitnessG2=FitnessG14;
        EnergiaG2=EnergiaG14;
case 15
        tabellaG2=tabellaG15;
        FitnessG2=FitnessG15;
        EnergiaG2=EnergiaG15;
case 16
        tabellaG2=tabellaG16;
        FitnessG2=FitnessG16;
        EnergiaG2=EnergiaG16;
end
```

Codice “creazione_cromosoma”- Creazione cromosoma a partire da tabella di controllo

```
function U=creazione_cromosoma(tabella, bit, geni, maxL)
N=2^bit;
for i=1:geni
    tabella(i)=round((tabella(i)/maxL)*N);
end
U = de2bi(tabella,bit,'left-msb');
```

Codice “riproduzione”- Riproduzione tra due cromosomi

```
function U=riproduzione(genitore1,genitore2,geni)

for i=1:geni%contatore geni
R=random('bino',1,0.5);%generazione casuale binomiale 0-1 proba-
bilità 50%
if R==0% se R=0 prendo gene da primo genitore
    U(i,:)= genitore1(i,:);
else%se R=1 prendo il gene dal secondo genitore
    U(i,:)= genitore2(i,:);

end
end
```

Codice “crossover”- Crossover tra due cromosomi

```
function [U1,U2]=crossover(cromosoma1,cromosoma2,geni,bit)
prob = 0.05;%probabilità di successo crossover
L = bit*geni;
c=random('bino',1,prob);
n=abs(rand*L );%posizione crossover

if c == 1%successo del crossover
    %da matrice a vettore riga
    cross1=reshape(cromosoma1',1,L);
    cross2=reshape(cromosoma2',1,L);
    % crossover
    for i=1:L
        if i<n
            finale1(i)=cross2(i);
            finale2(i)=cross1(i);
        end
        if i>n
            finale2(i)=cross2(i);
            finale1(i)=cross1(i);
        end
    end
    %da vettore riga a matrice
    U1=reshape(finale1',bit,geni);
    U2=reshape(finale2',bit,geni);
```

```
    U1=U1';
    U2=U2';
else
    U1=cromosoma1;
    U2=cromosoma2;
end
```

Codice “mutazione”- Mutazione bit del cromosoma

```
function U=mutazione(cromosoma,geni,bit)
prob=0.05;%probabilità successo mutazione
for i=1:geni
    for j=1:bit
        R=random('bino',1,prob);
        if R==1
            cromosoma(i,j)= not(cromosoma(i,j));
        end
    end
end
U=cromosoma;
```

Codice “riordino”- Riordino geni nel cromosoma

```
function U=riordino(cromosoma,geni)
cromosoma= bi2de(cromosoma,'left-msb');
for i=1:geni
    for j=1:(geni-1)
        if cromosoma(j)>cromosoma(j+1)
            x=cromosoma(j+1);
            cromosoma(j+1)=cromosoma(j);
            cromosoma(j)=x;
        end
    end
end
U = de2bi(cromosoma,'left-msb');
```

Codice “creazione_tabella”- Creazione tabella di controllo a partire da un cromosoma

```
function U=creazione_tabella(cromosoma, bit, geni, maxL);
N=2^bit;
cromosoma= bi2de(cromosoma,'left-msb');
for i=1:geni
    U(i)=round((cromosoma(i)/N)*maxL);
end
U=U';
```

Codice “fattoreritardi”- Restituisce il valore del fattore ritardi

```
function U=fattoreritardi(t_programmato, t_percorrenza);
delta=abs(t_programmato-t_percorrenza);
c_p=0.02; %incremento addizionale di energia per recuperare 1 s
di ritardo, in caso impostare a 0.05
```

```
U=(1+c_p)^delta;
```

Codice “fitness”- Valutazione del valore del Fitness

```
function U=fitness(Energia, fattore_ritardi)
```

```
U=100/(Energia*fattore_ritardi);
```

Codice “fittest3”- Restituisce i due cromosomi con fitness maggiore

```
function [U1,U2]=fittest(Classifica)
```

```
for i=1:6;
    for j=1:5
        if Classifica(j,1)>Classifica(j+1,1)
            x=[Classifica(j+1,1) Classifica(j+1,2)];
            Classifica(j+1,1)=Classifica(j,1);
            Classifica(j+1,2)=Classifica(j,2);
            Classifica(j,1)=x(1,1);
            Classifica(j,2)=x(1,2);
        end
    end
end
```

```
U1=Classifica(6,2); %in base al riordino il migliore è l'ultimo. restituisce il nome
```

```
U2=Classifica(5,2);
```

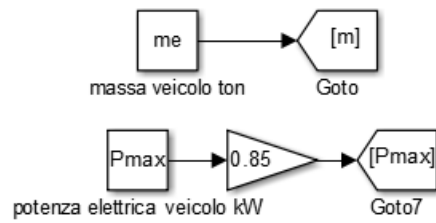
Codice “tabellaramdom”- Crea tabelle di controllo casuali

```
function U=tabellarandom(maxL, geni)
```

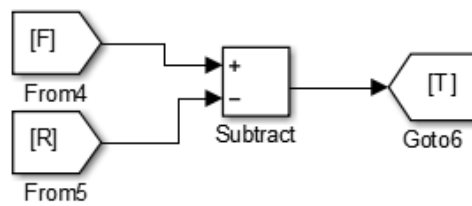
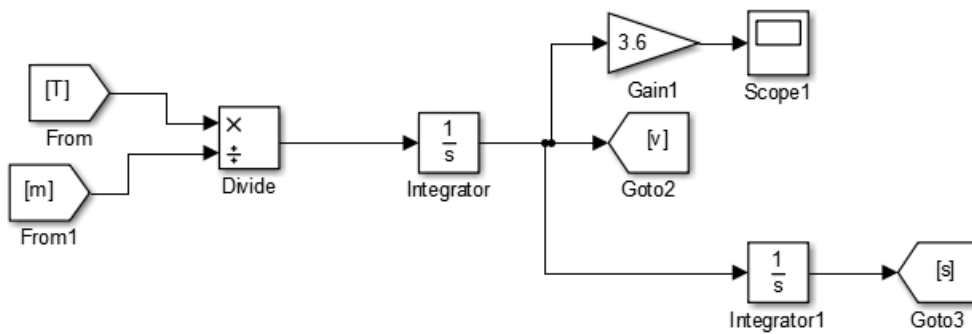
```
for i=1:geni
    x=randi(maxL);
    U(i)=x;
end
```

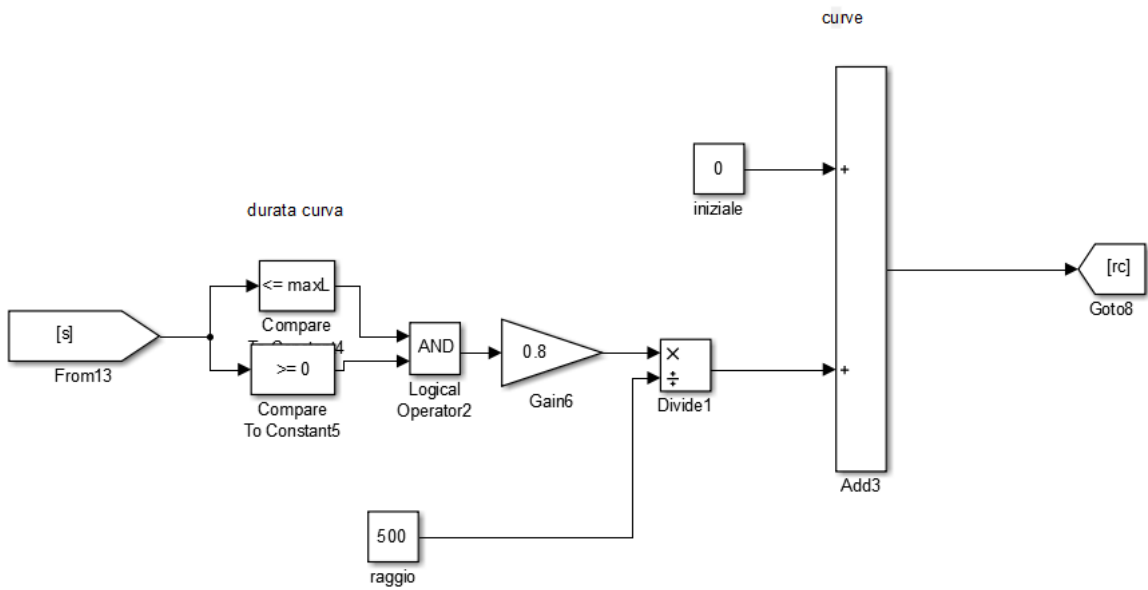
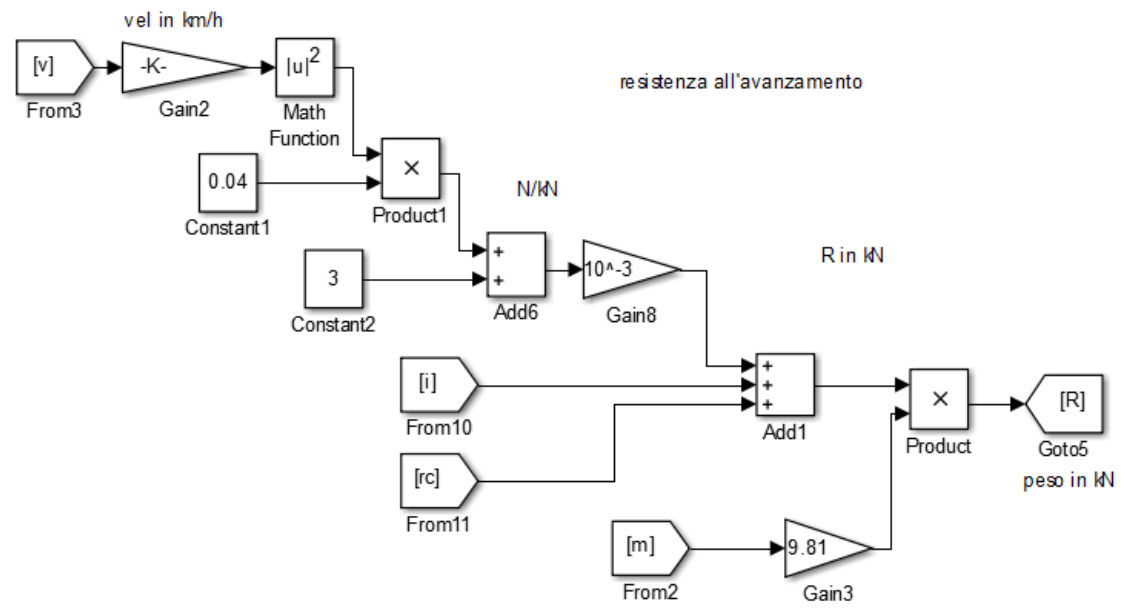

APPENDICE B - Codice Simulink

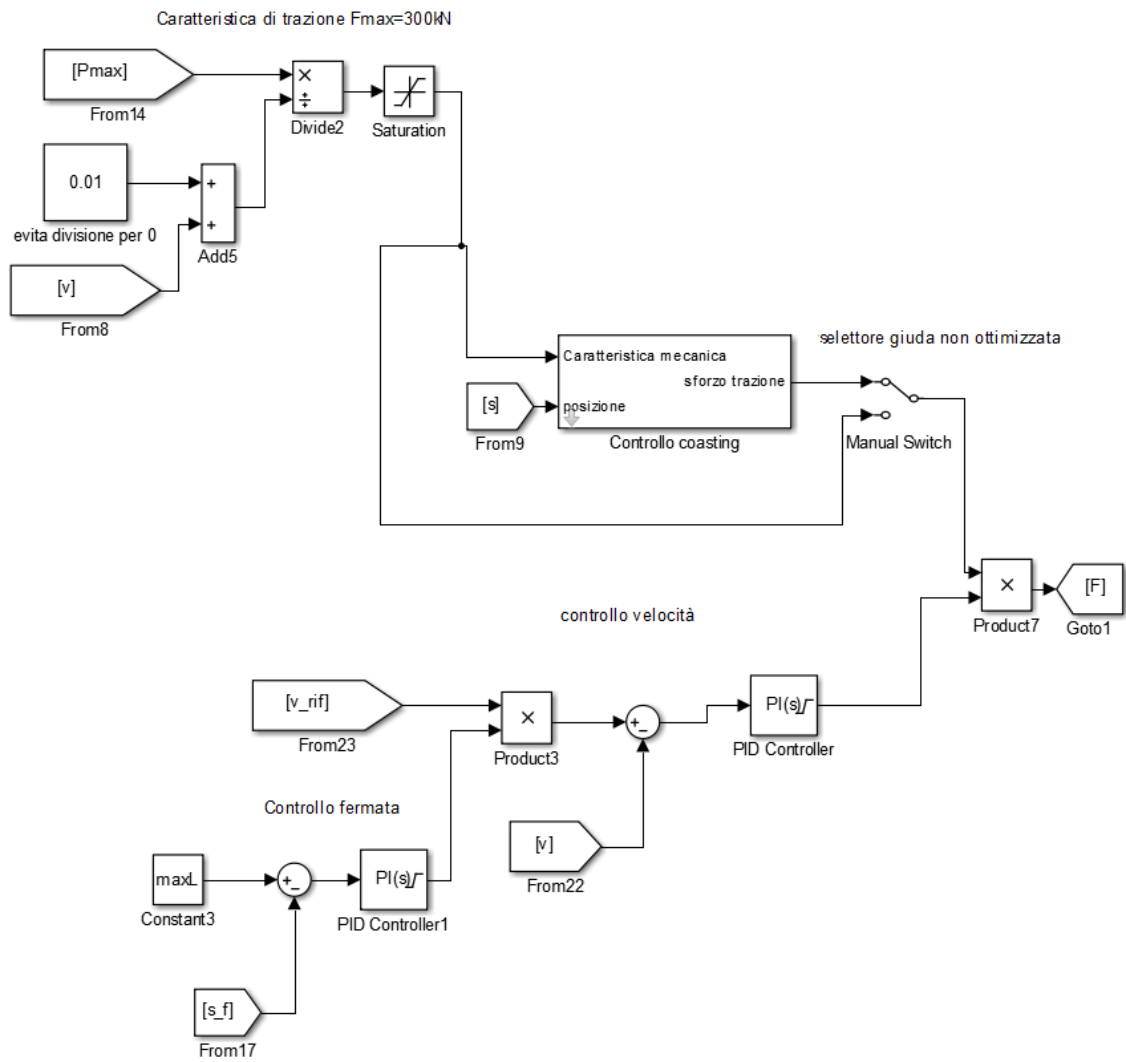
dati

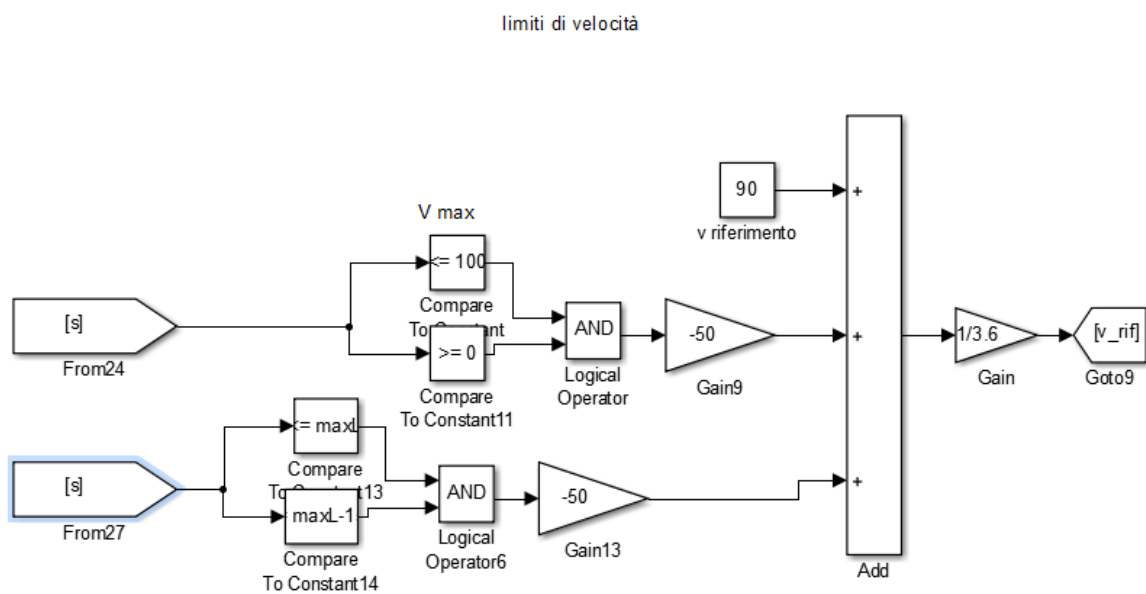
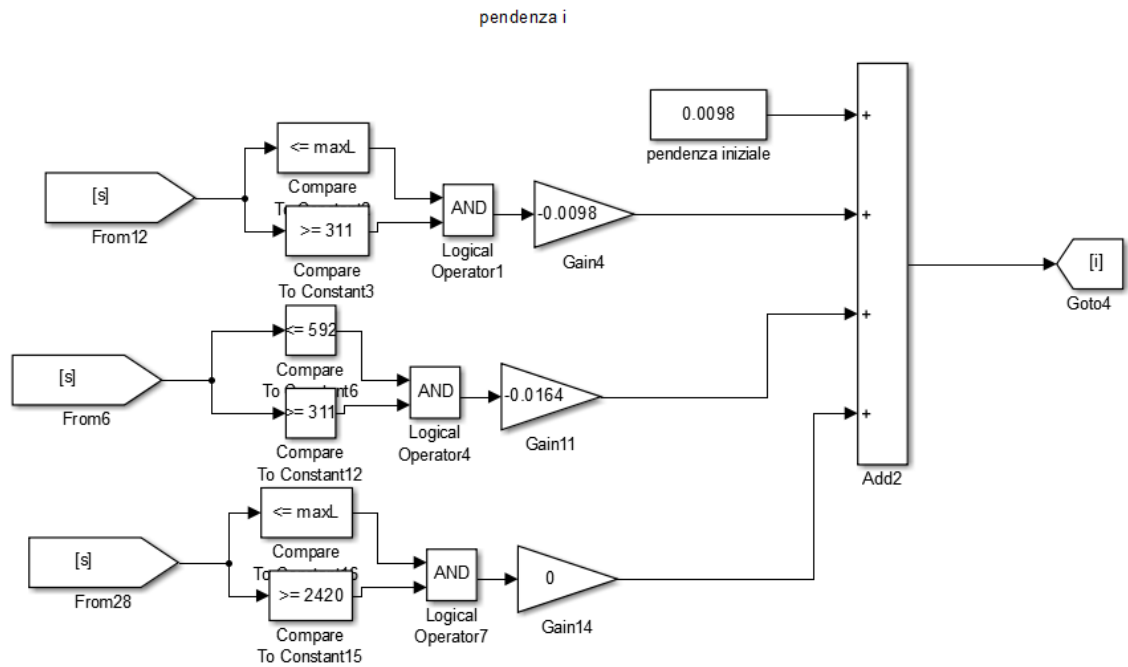


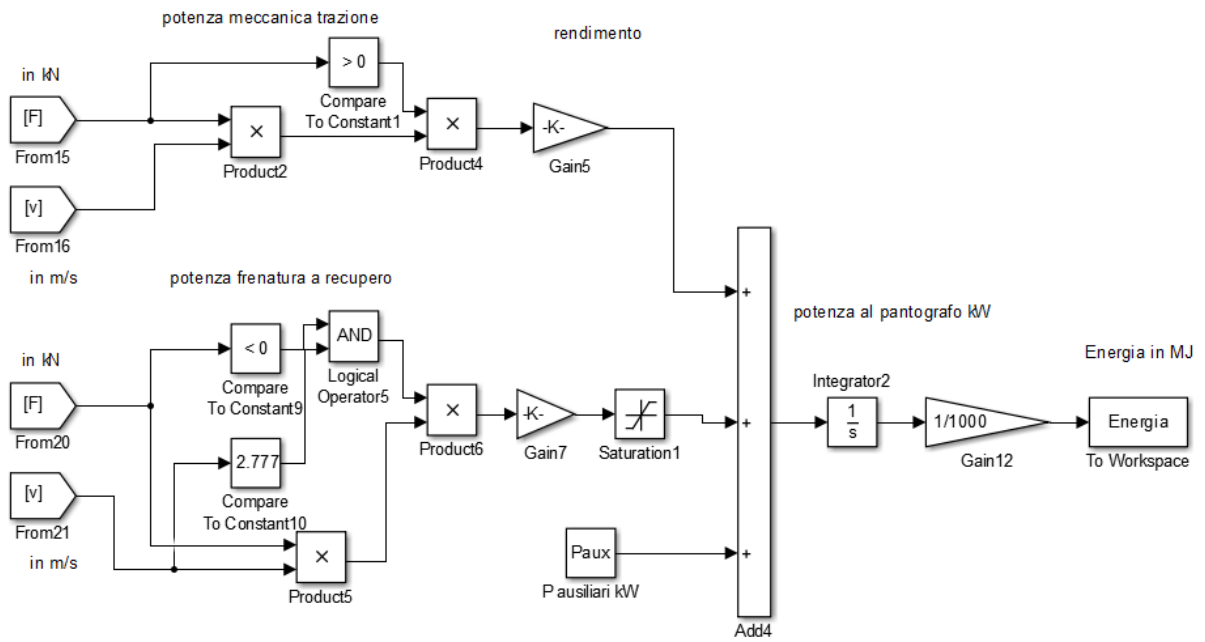
eq. dinamica



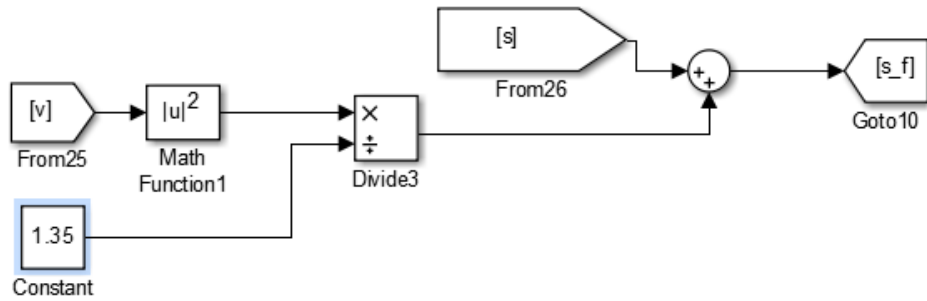




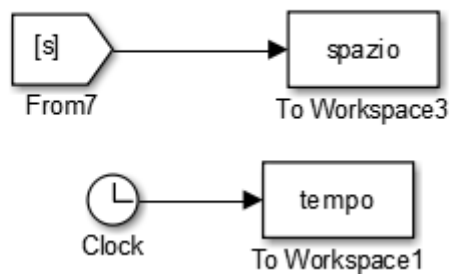




stima spazio d'arresto con decelerazione media

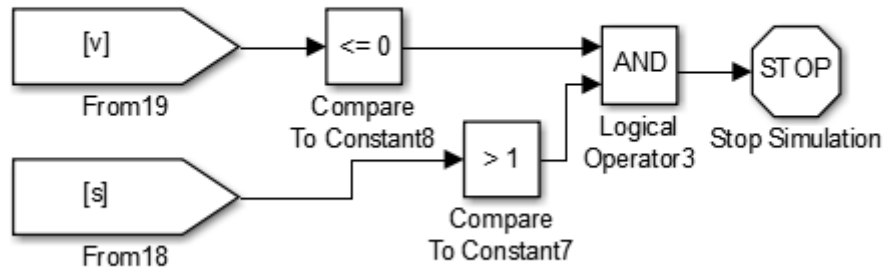


Dati in uscita

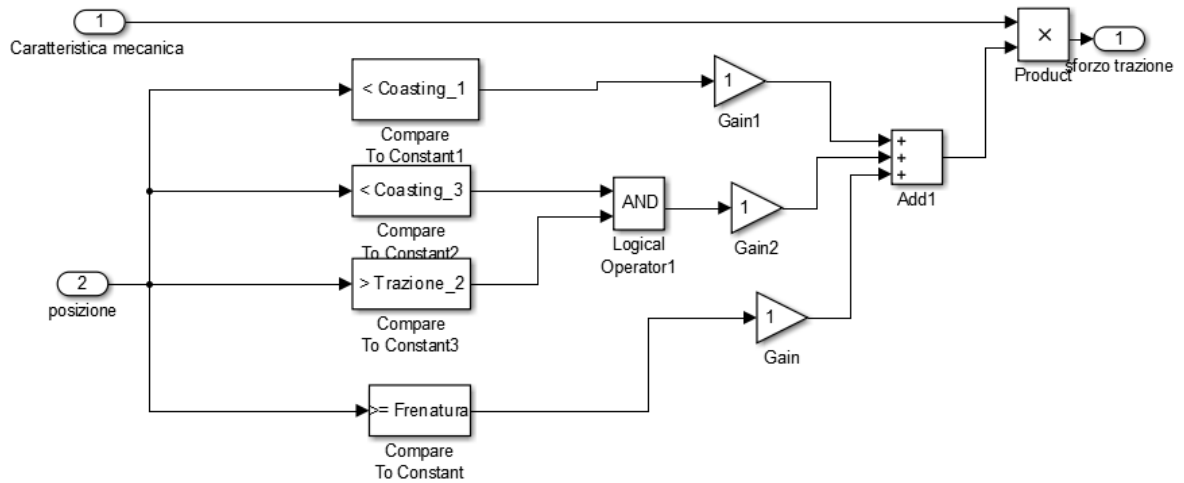


stop simulazione

mettere 0

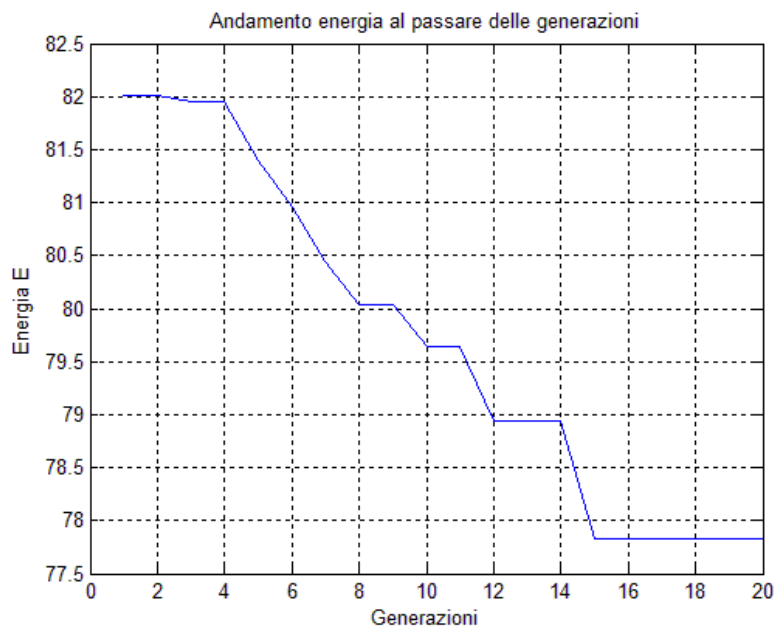
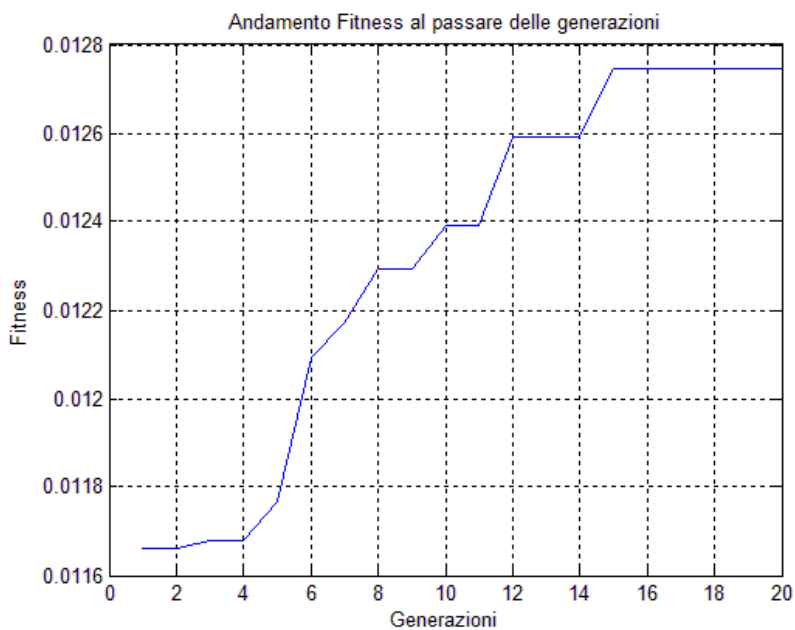


Subsystem "Controllo coasting"

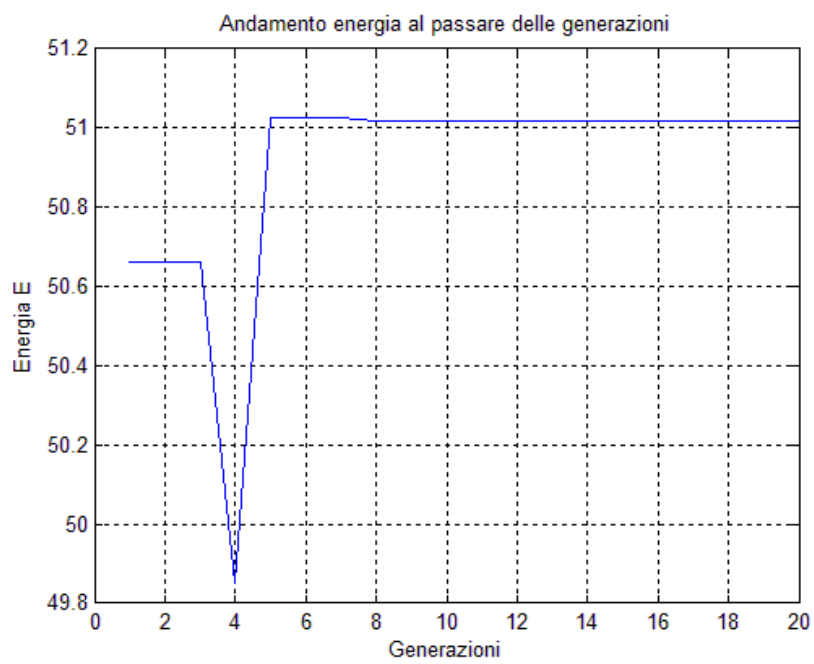
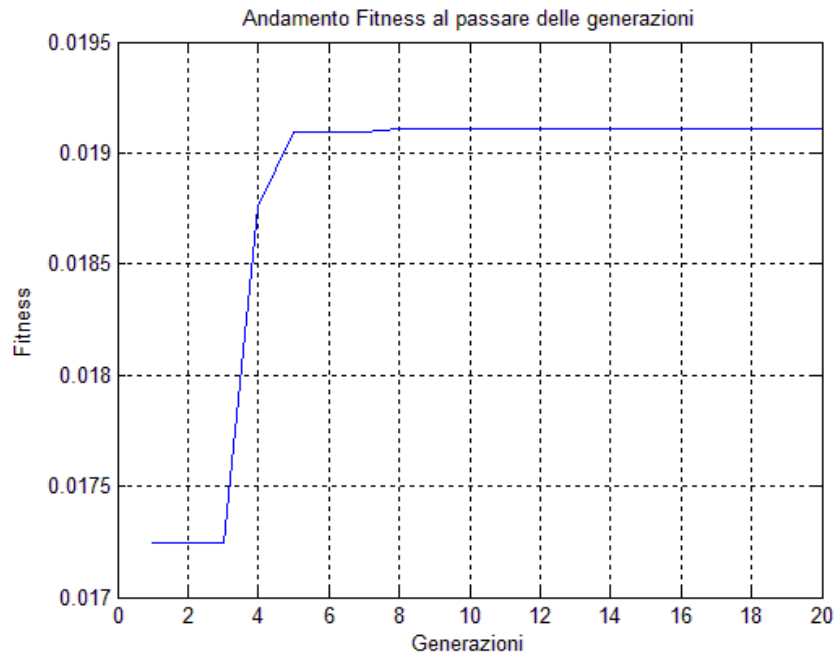


APPENDICE C – Andamenti di fitness e energia per le altre tratte

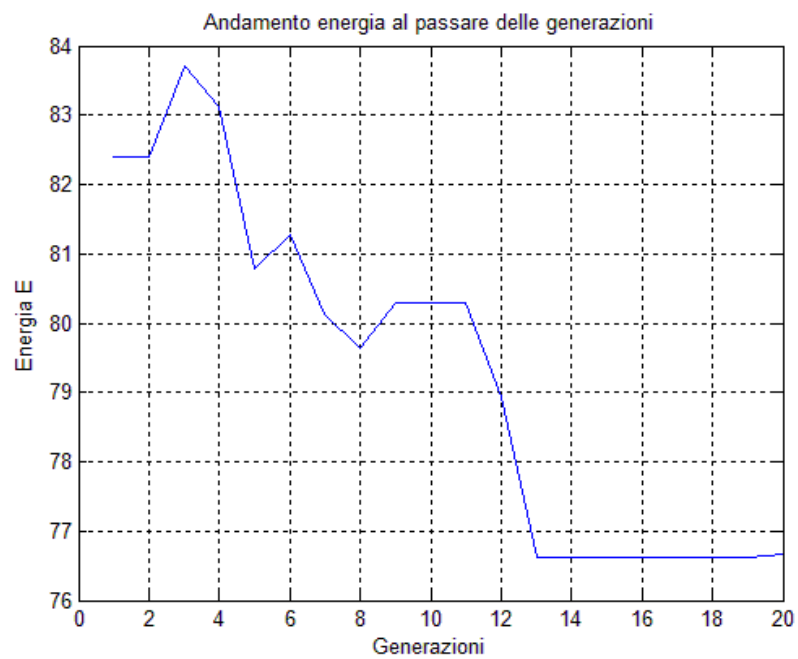
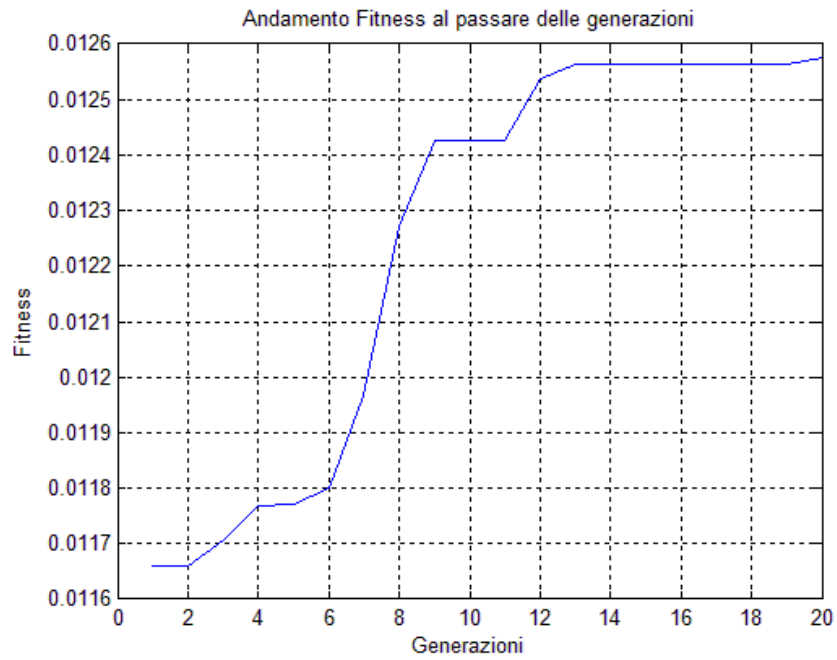
A-B



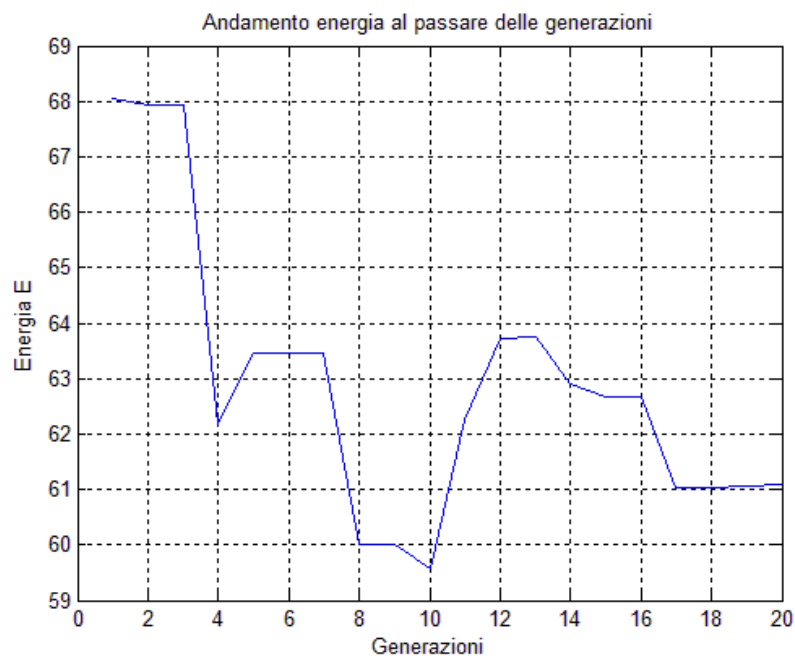
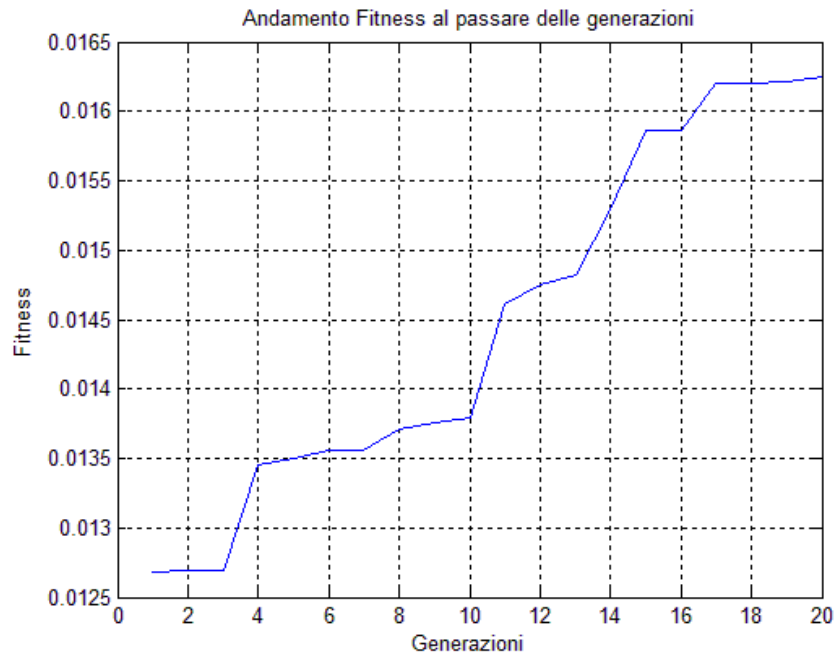
B-C



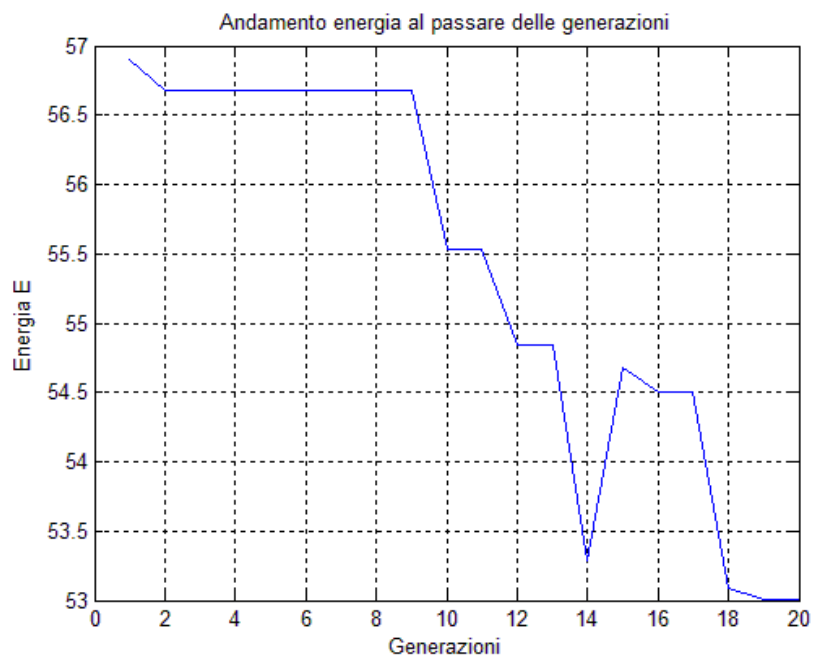
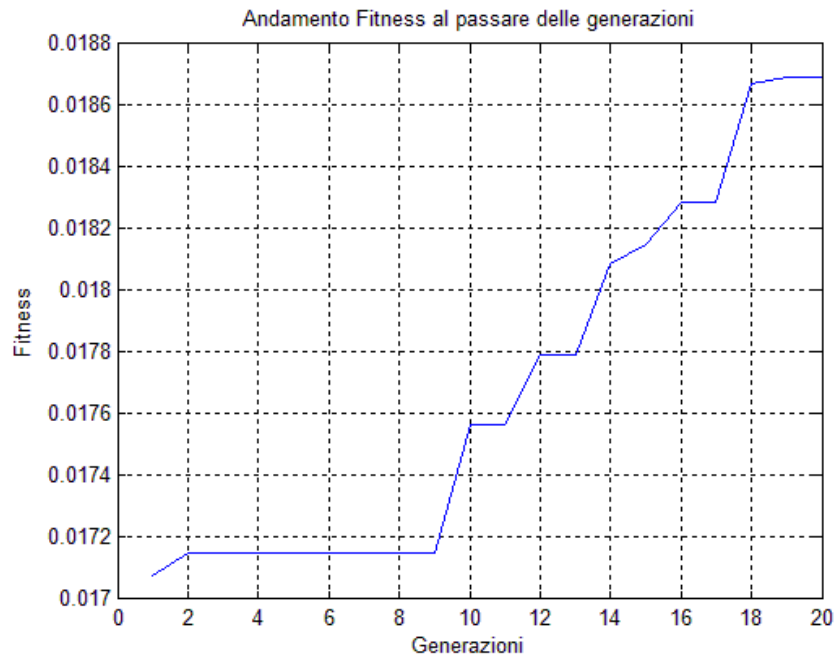
C-D



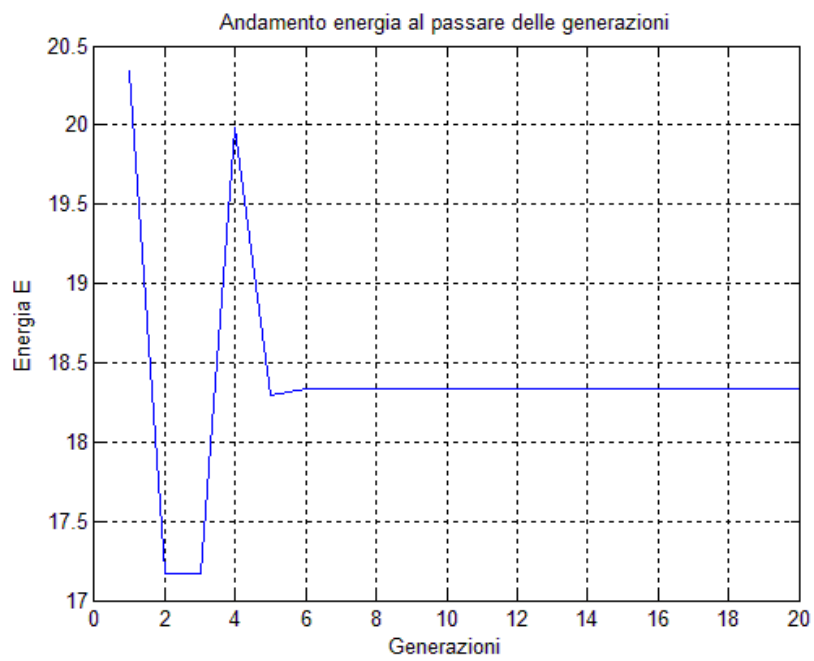
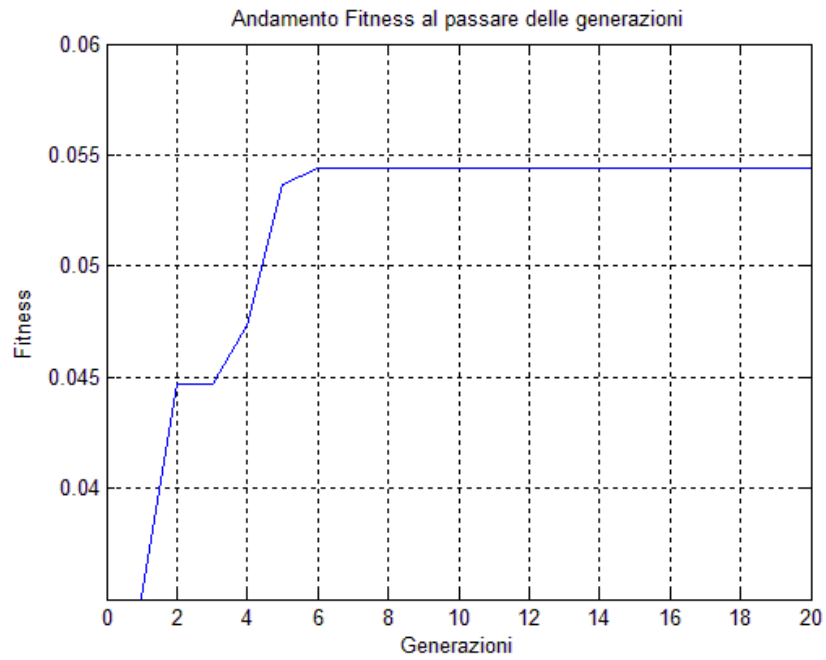
D-E



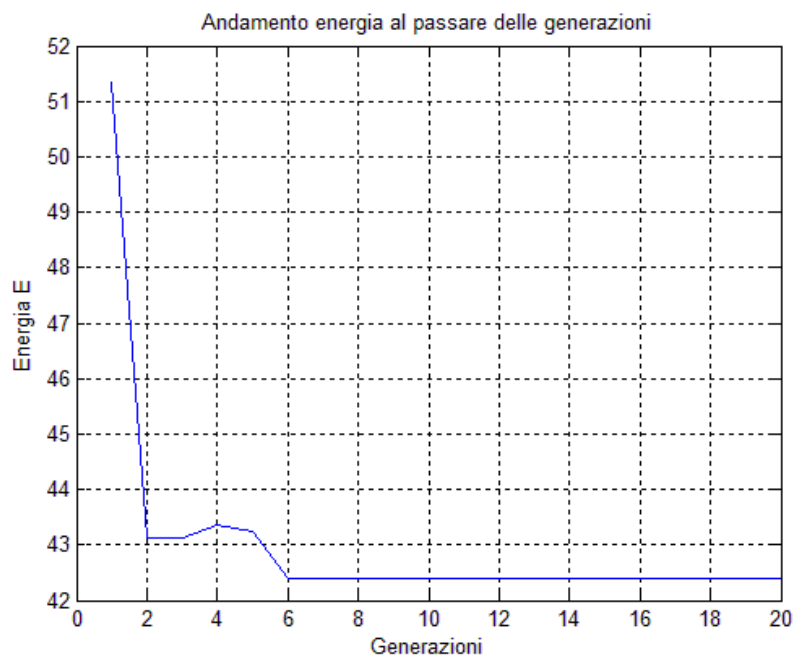
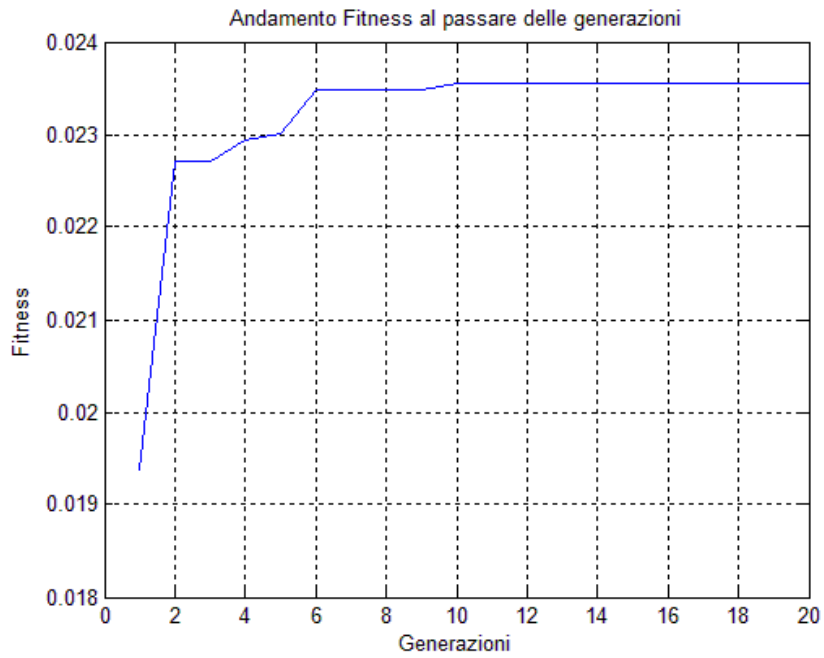
E-F



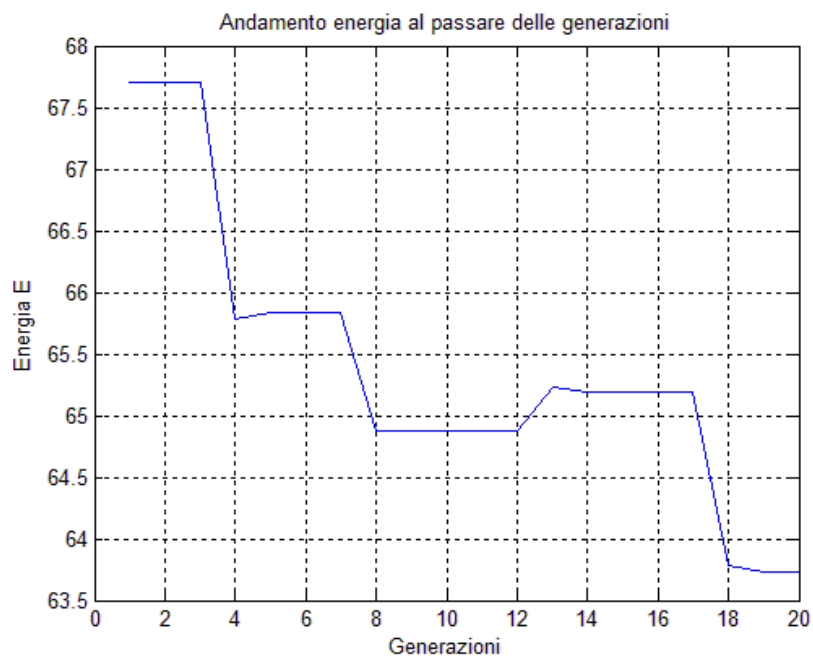
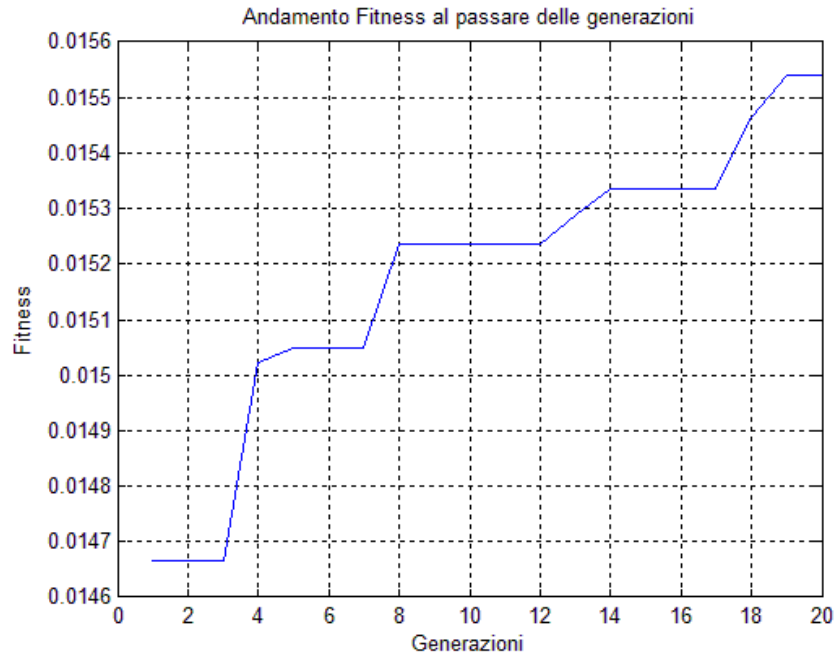
F-G



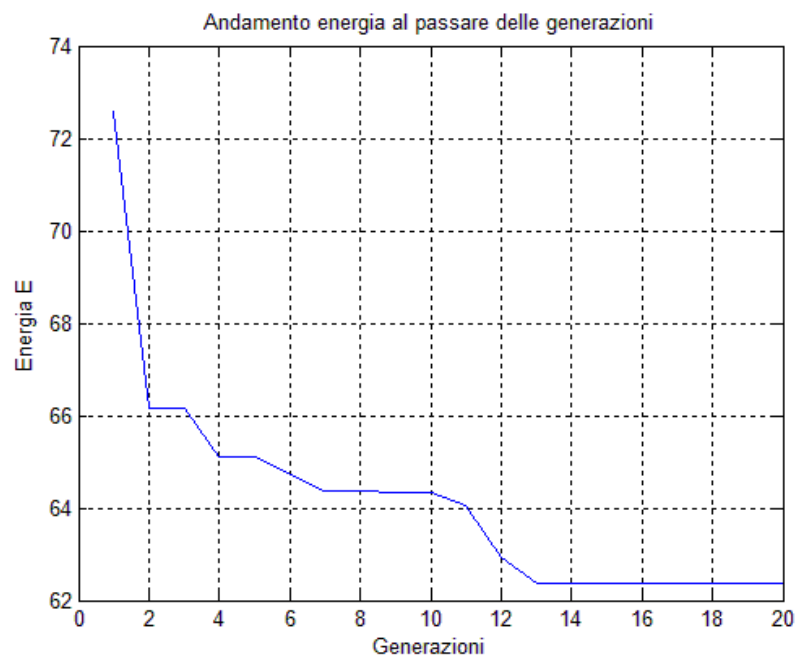
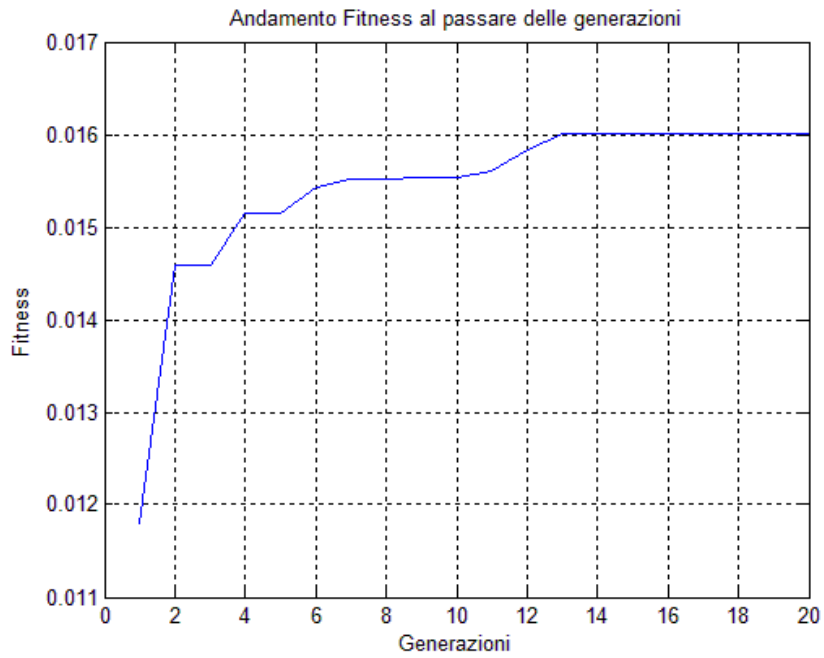
G-H



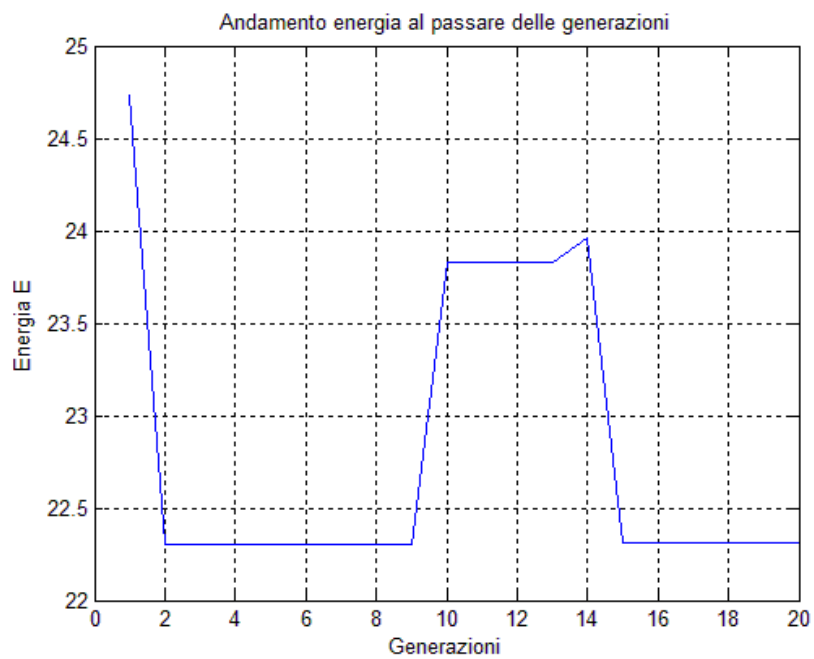
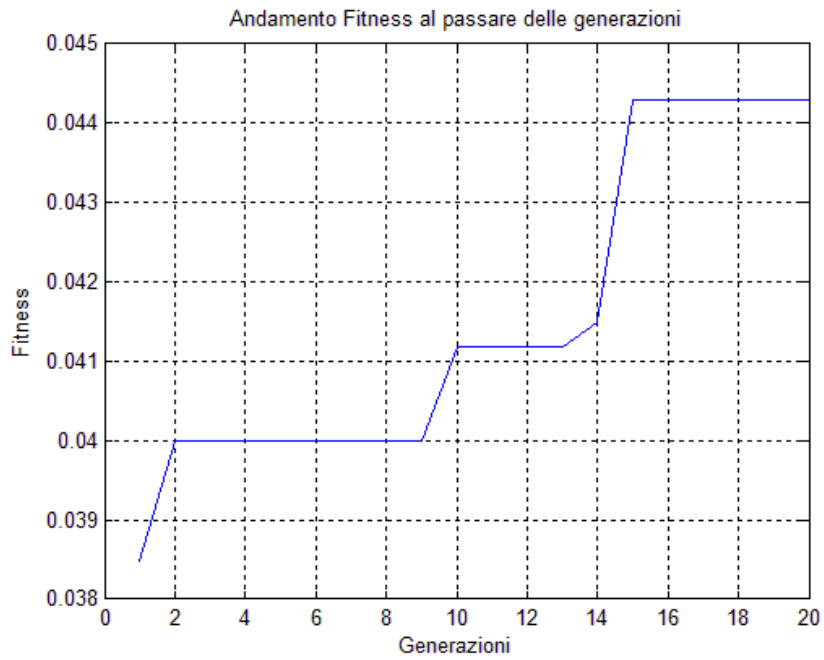
H-I



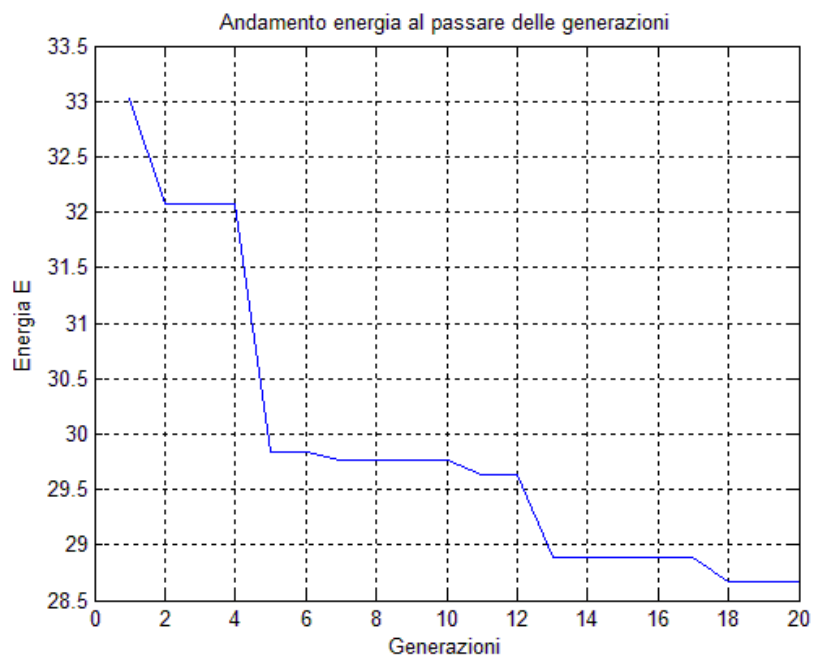
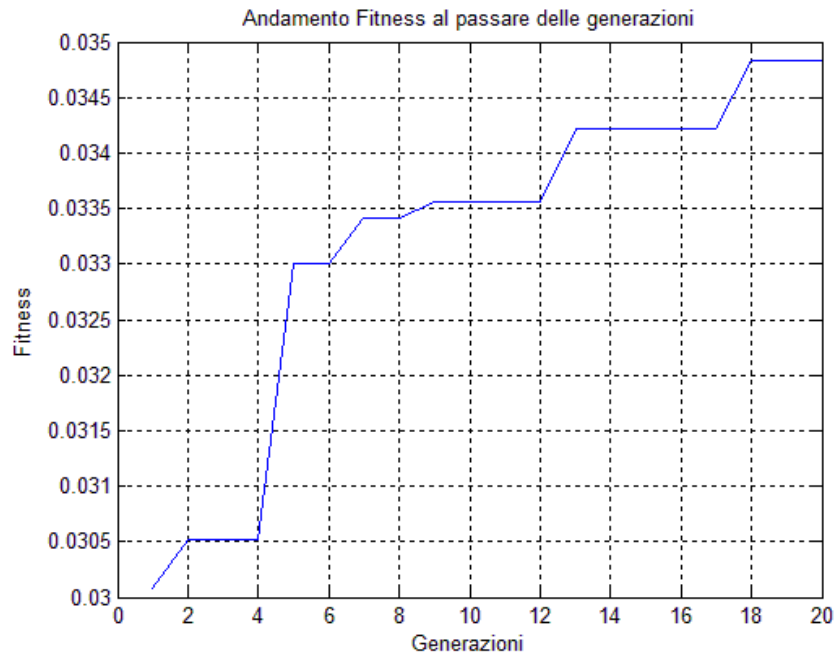
I-J



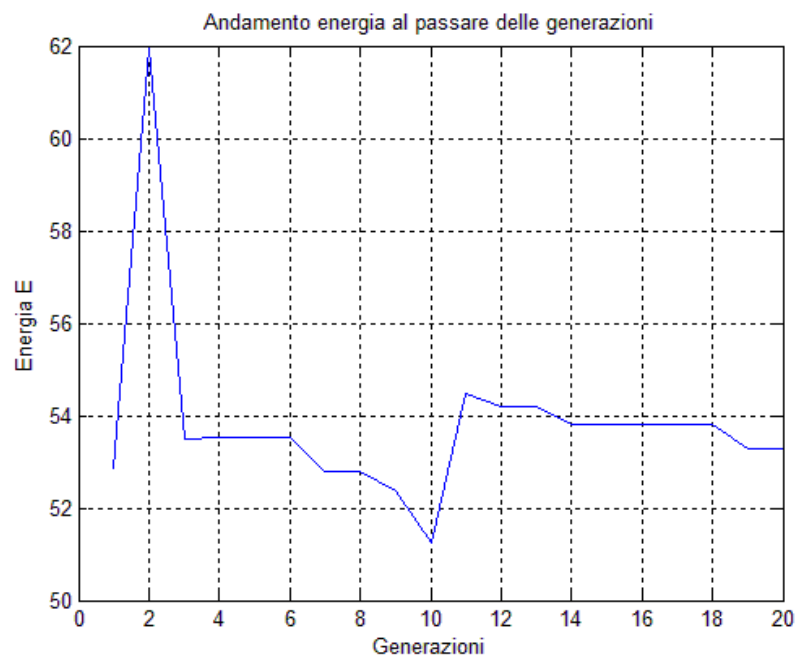
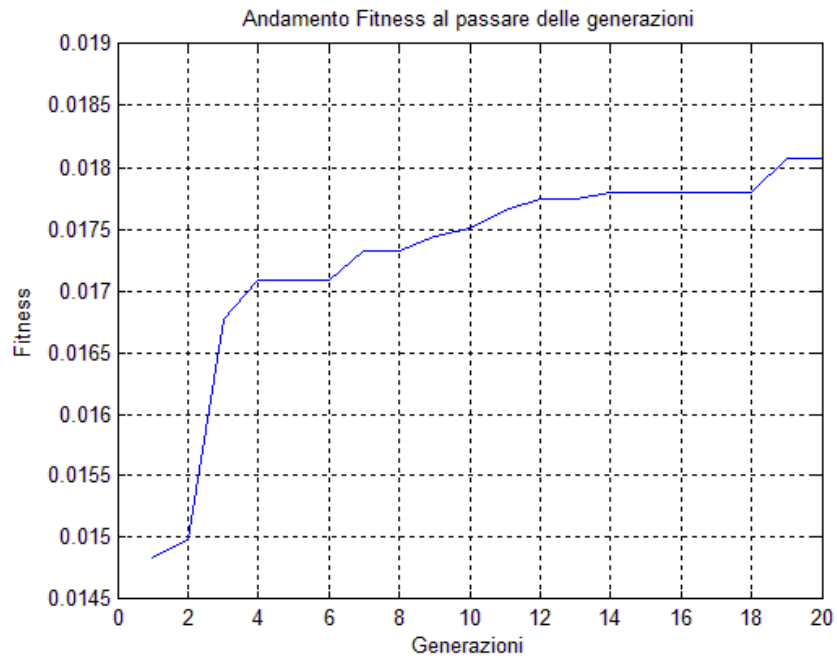
J-K



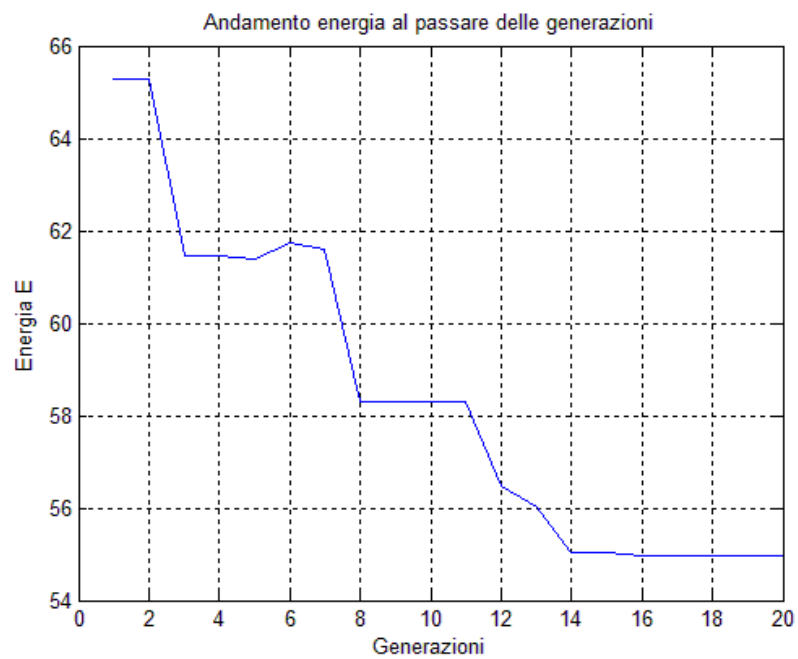
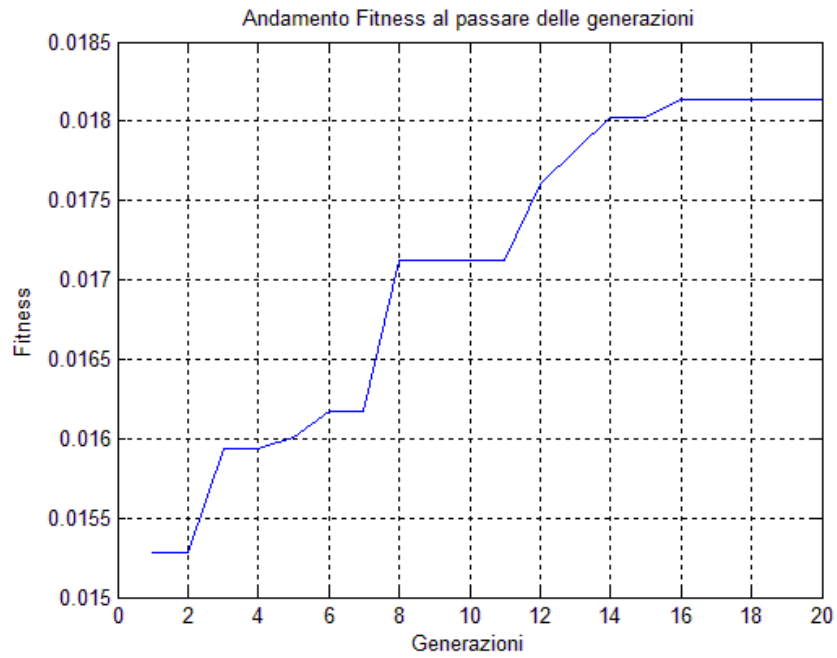
K-L



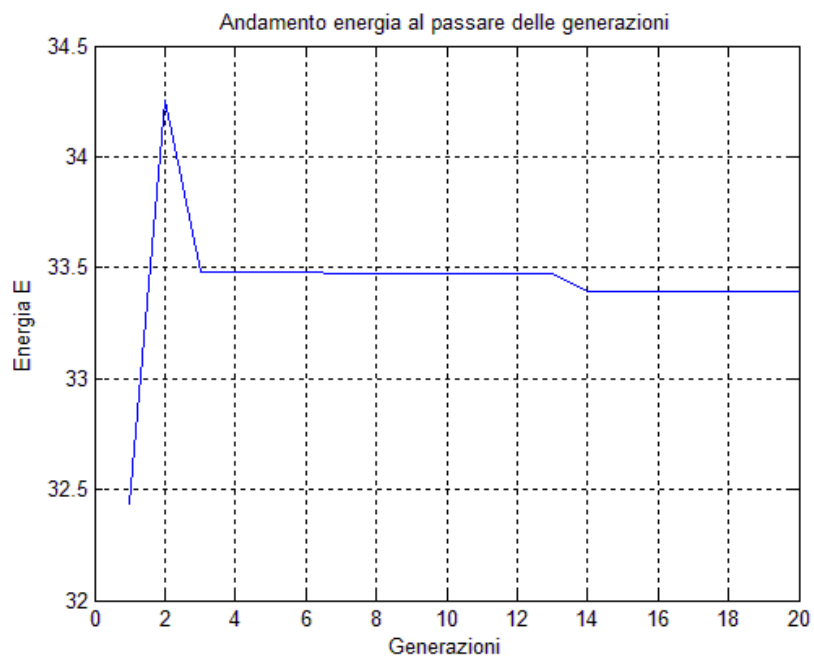
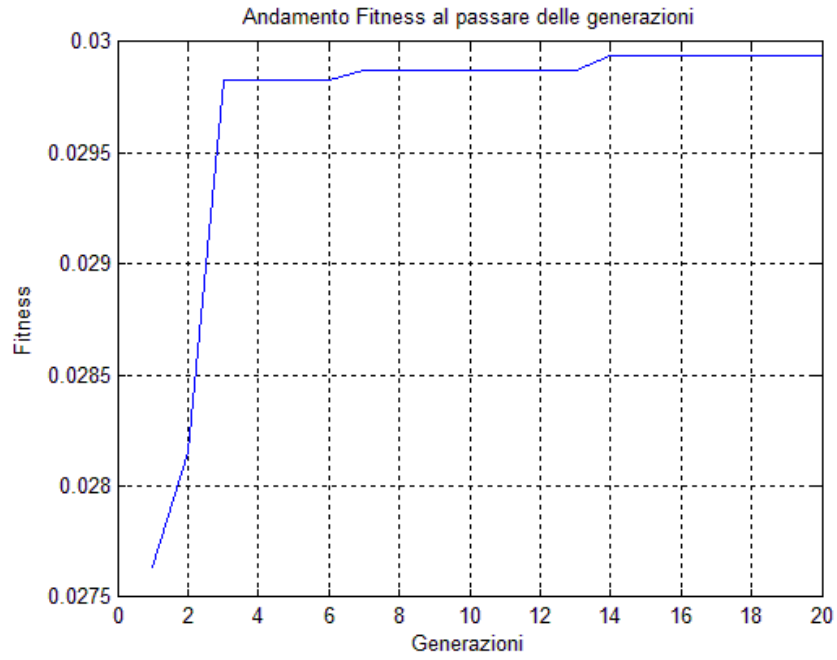
L-M



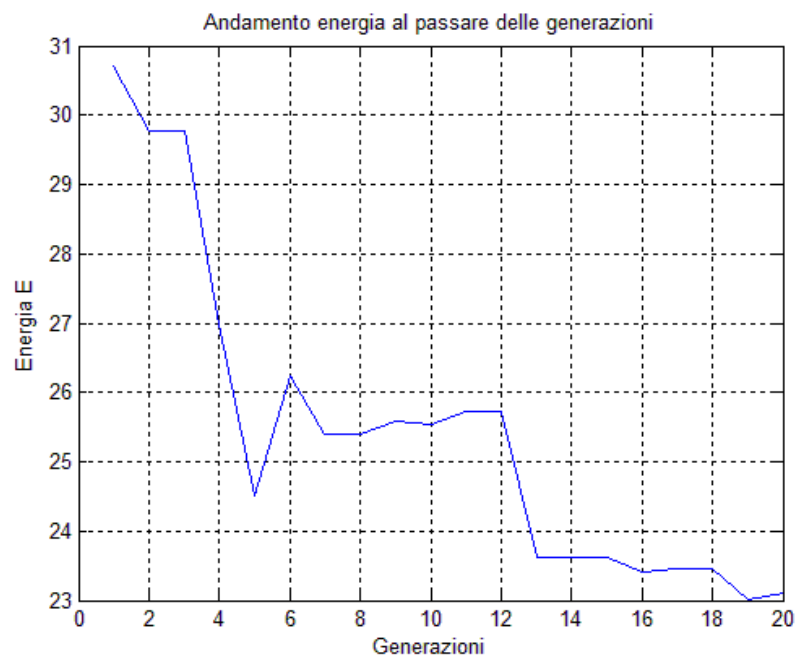
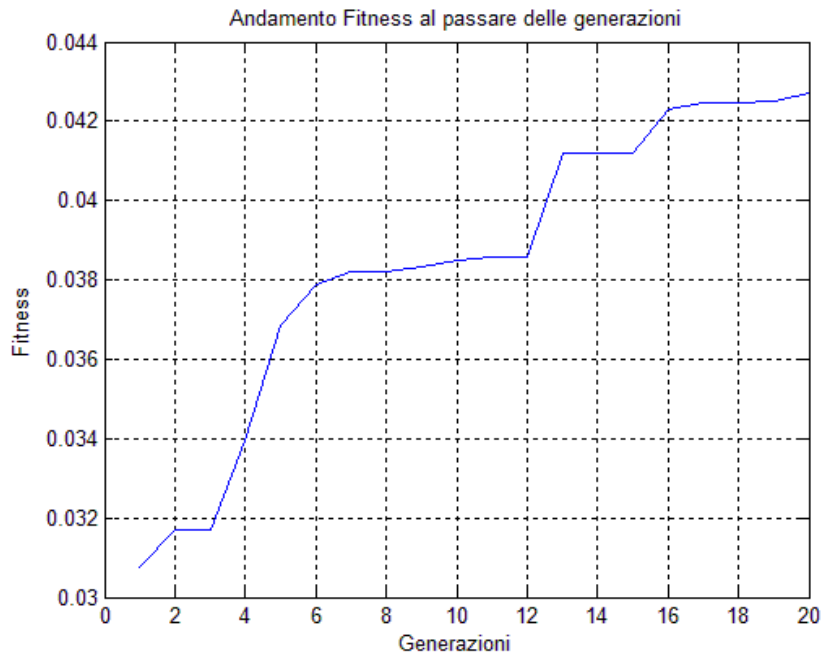
N-O



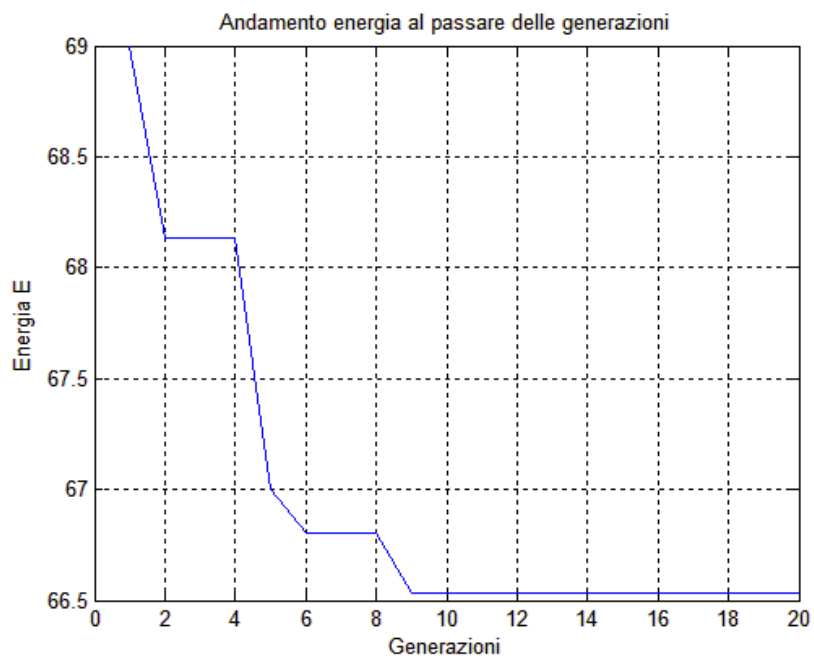
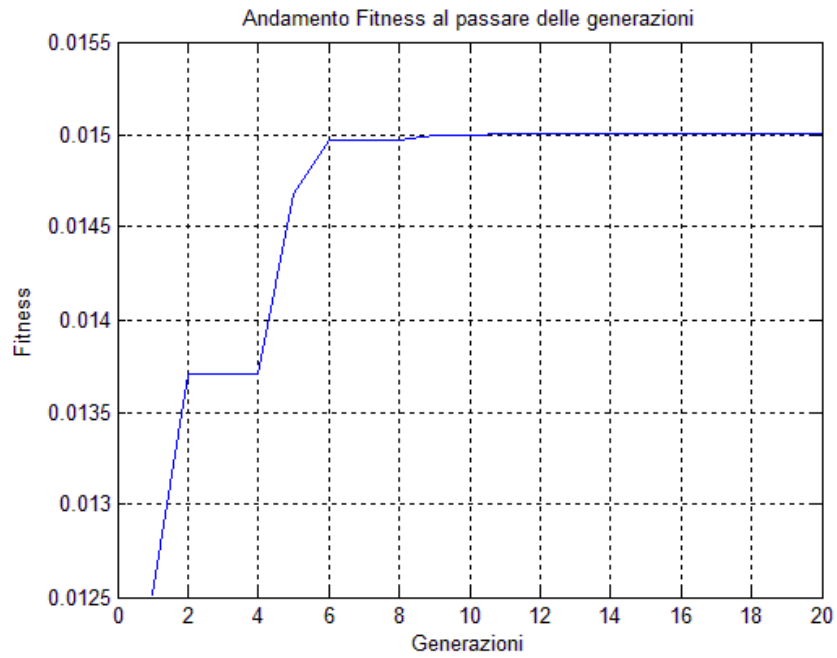
O-P



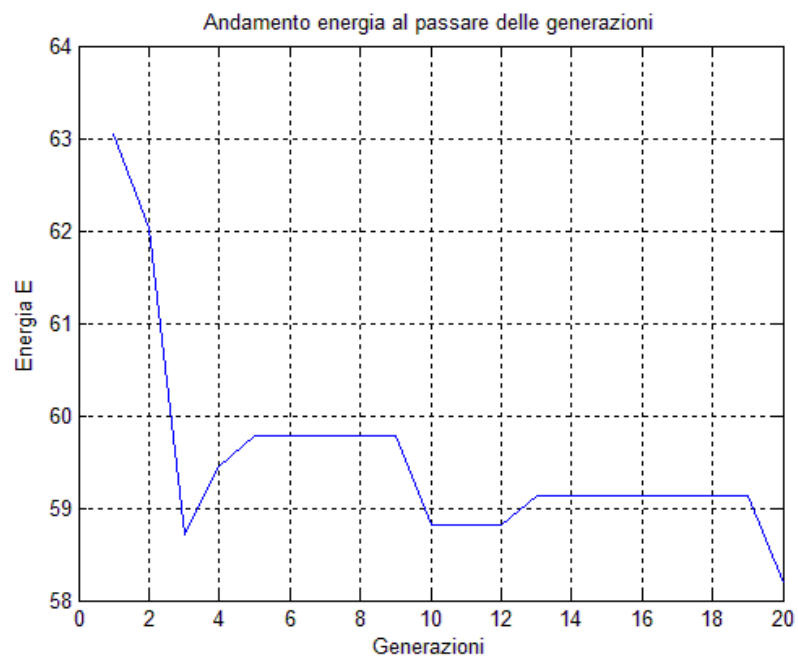
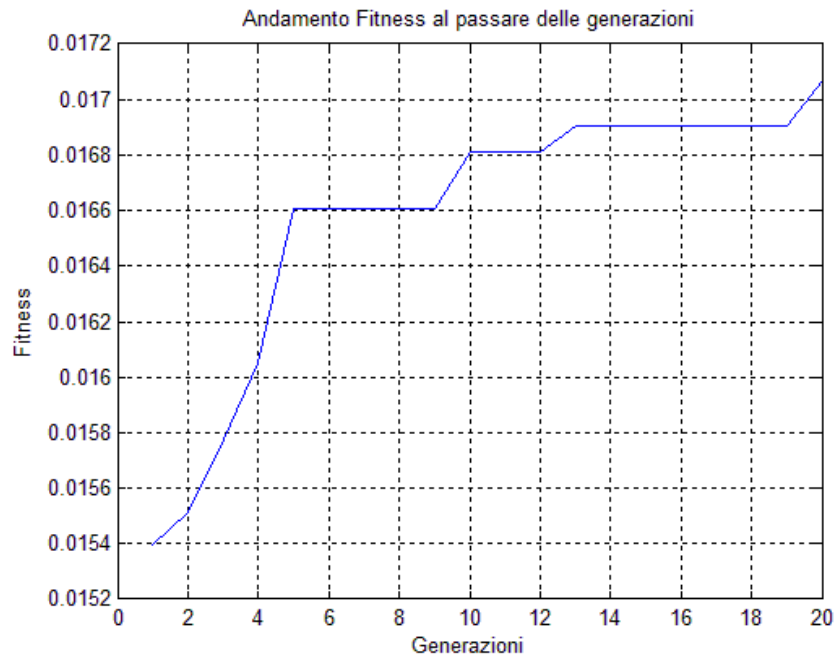
P-Q



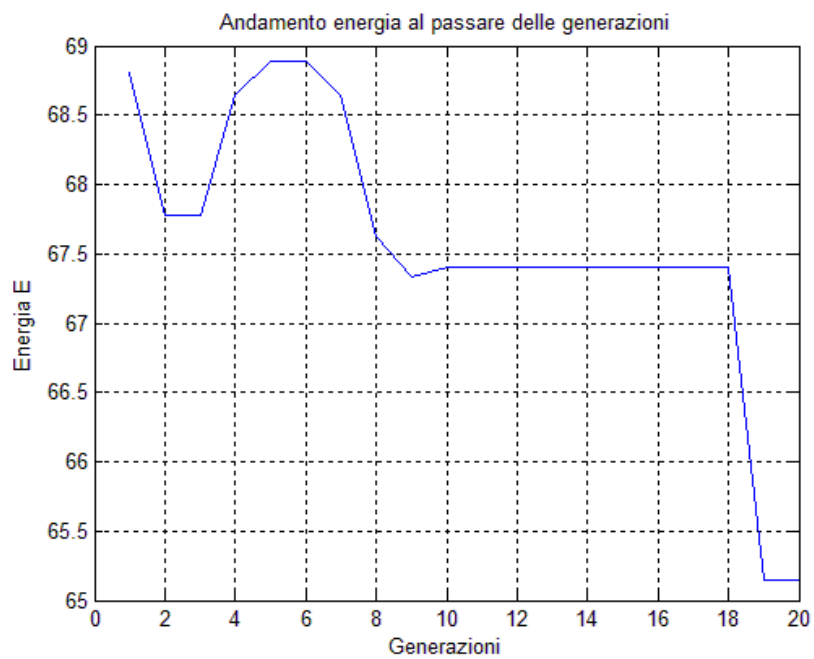
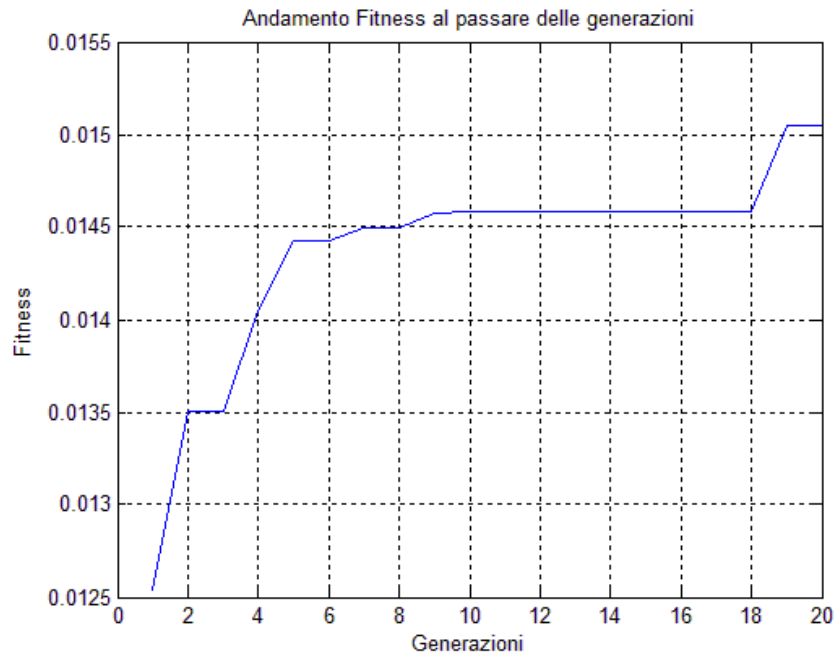
Q-R



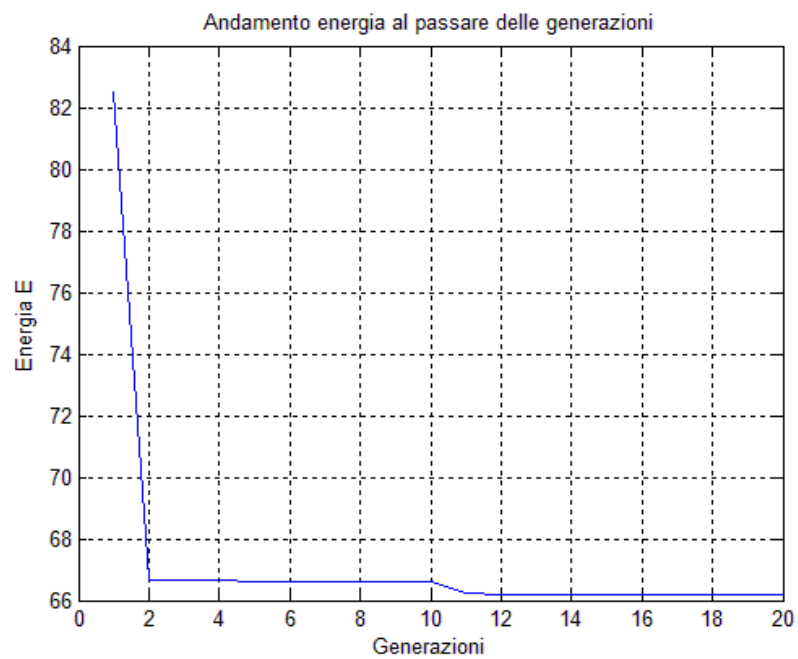
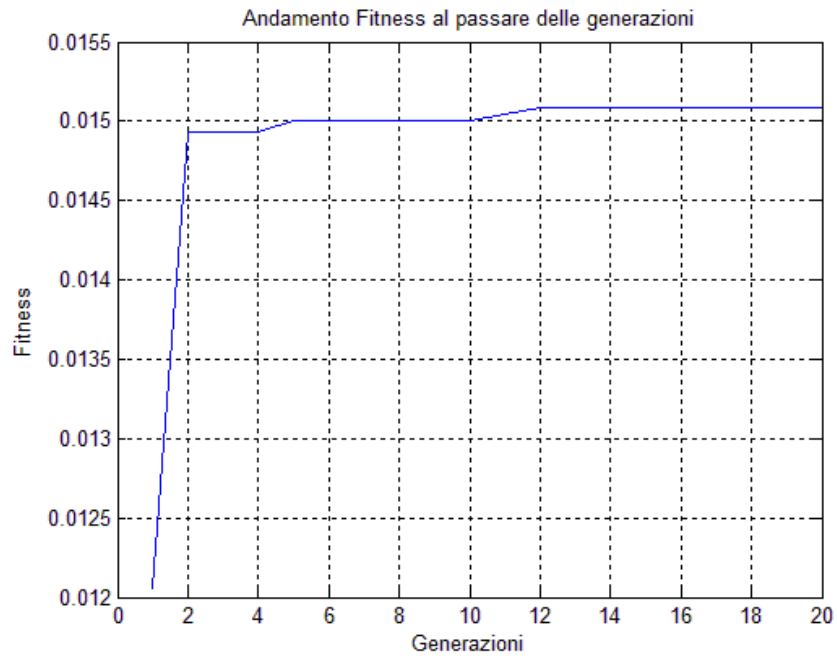
S-T



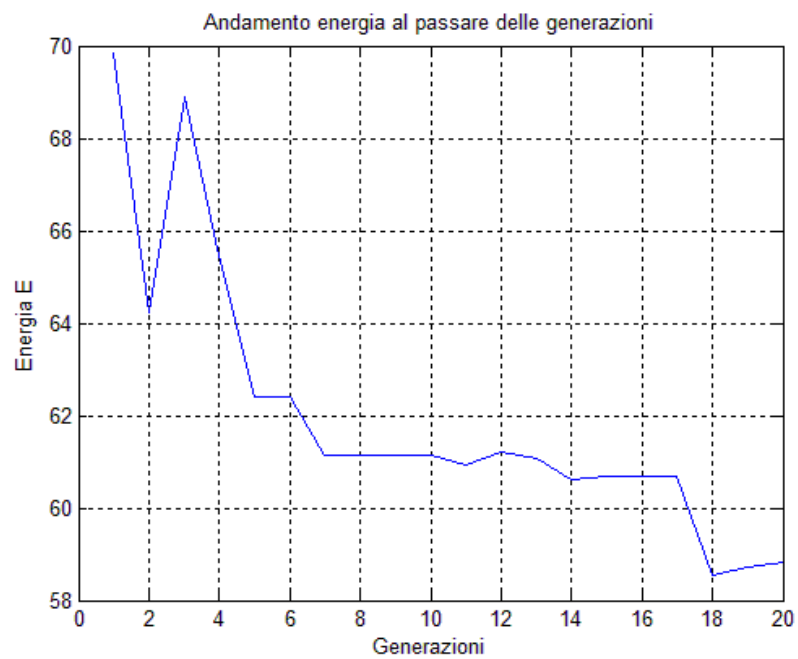
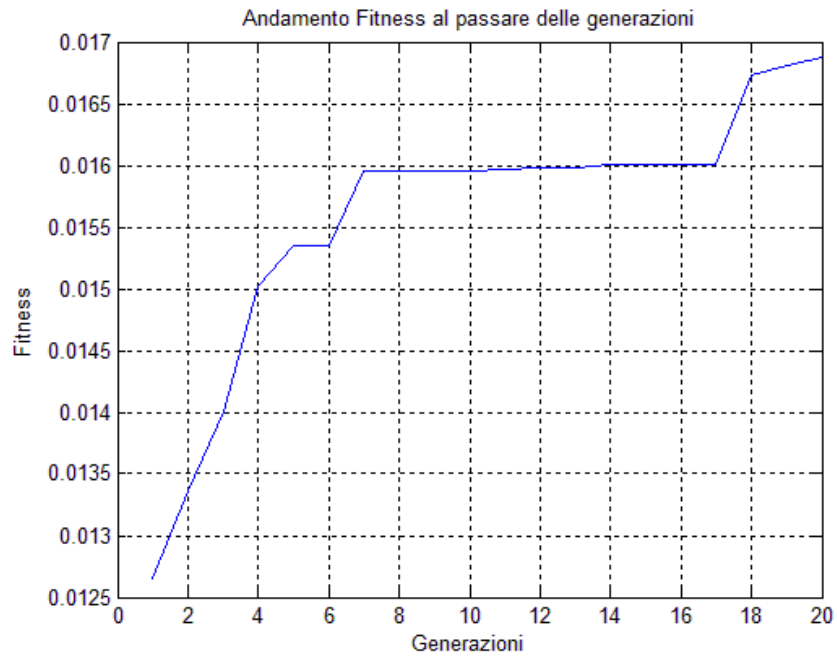
T-U



U-V



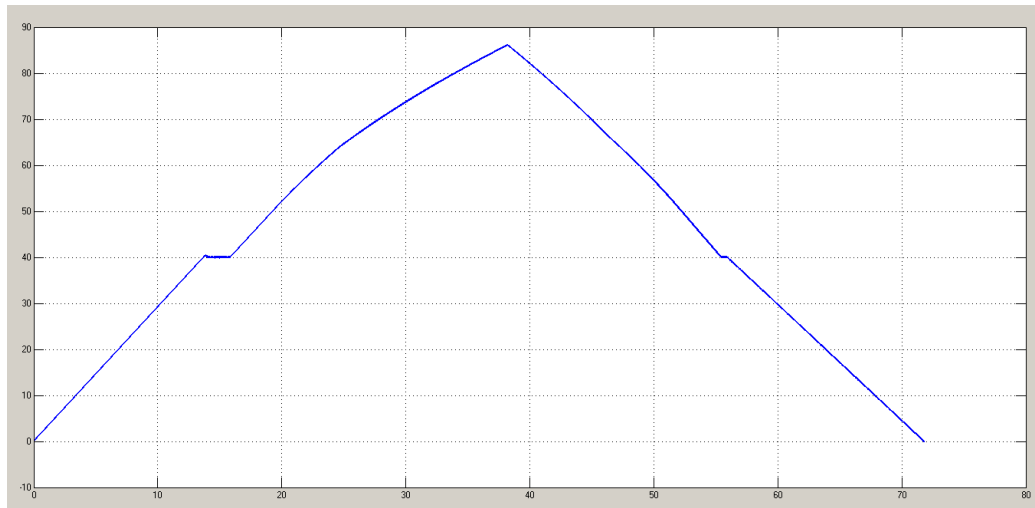
W-Z



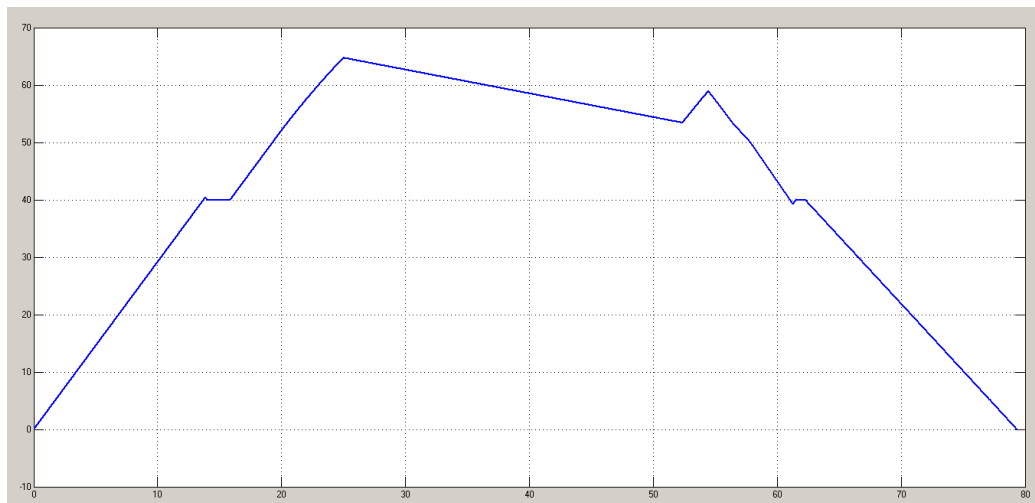
APPENDICE D – Diagrammi velocità tempo caso non ottimizzato e EED altre tratte

A-B

Non ottimizzata

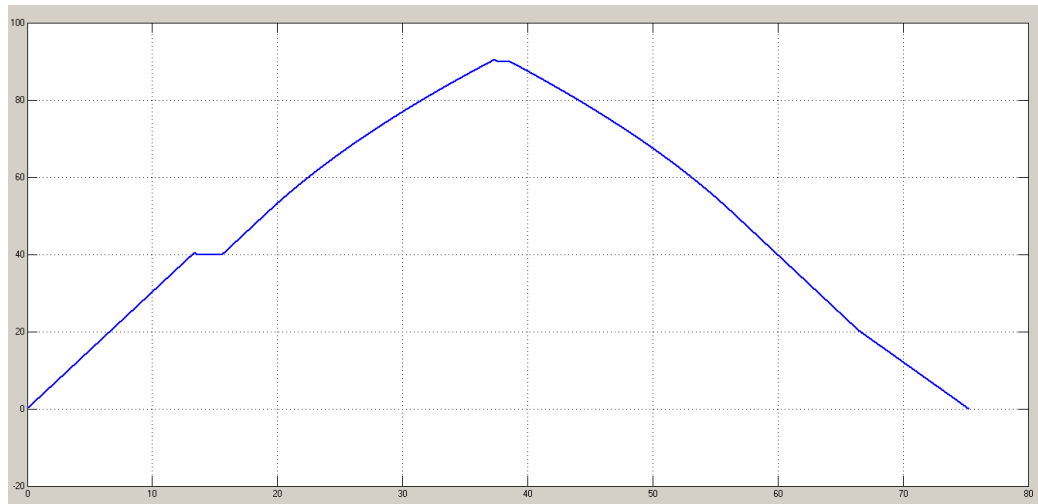


EED

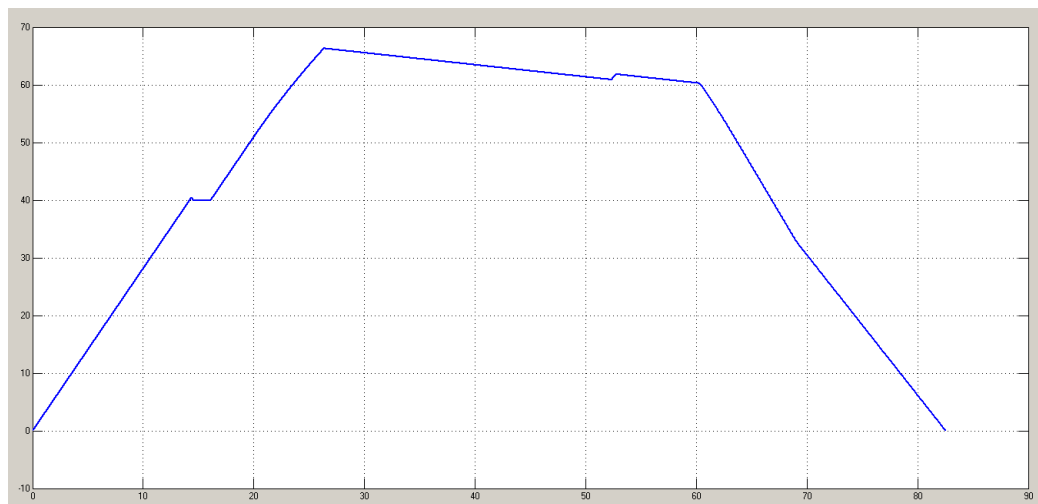


B-C

Non ottimizzata

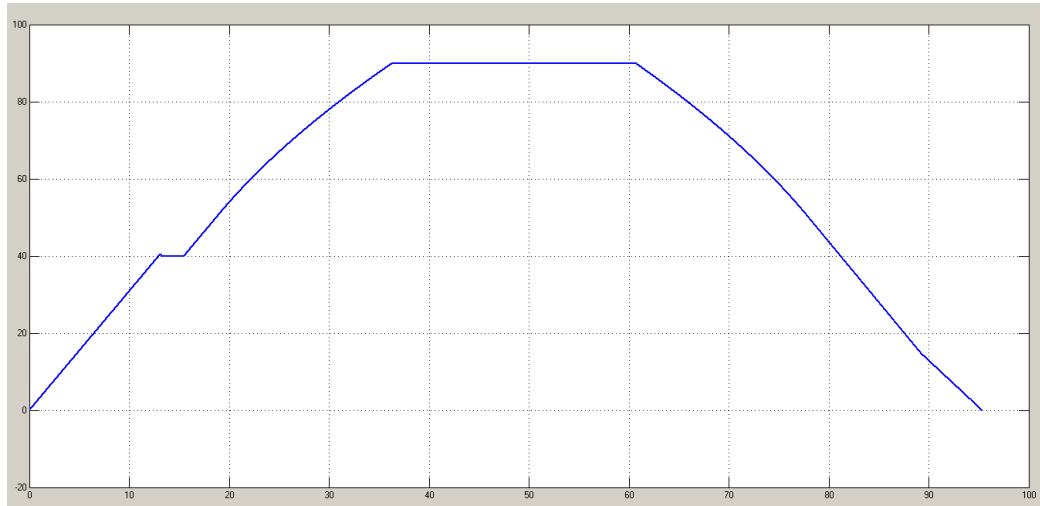


EED

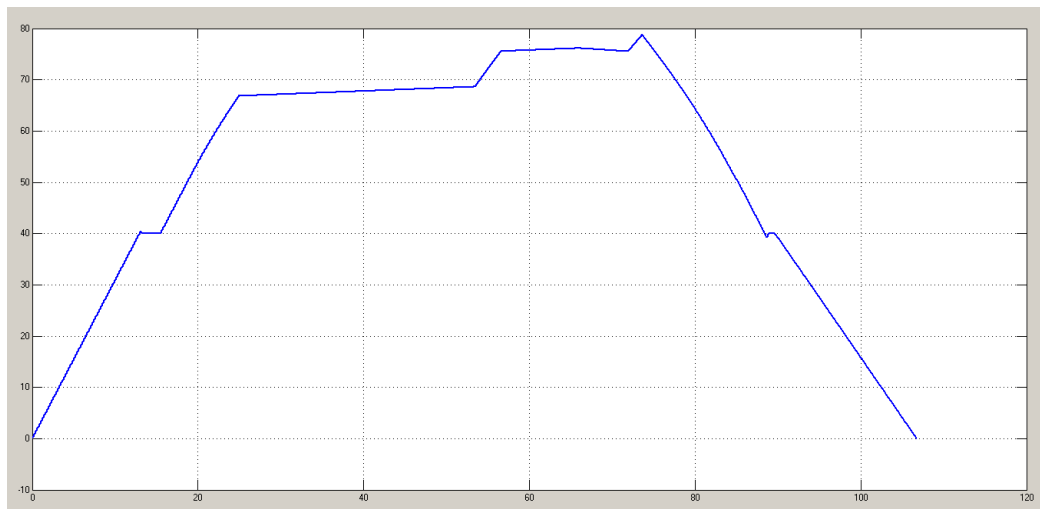


C-D

Non ottimizzata

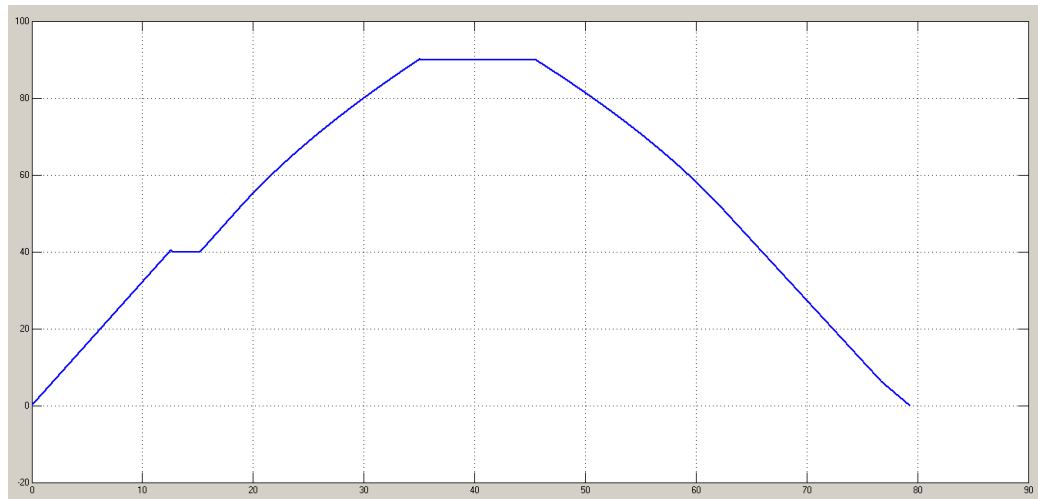


EED

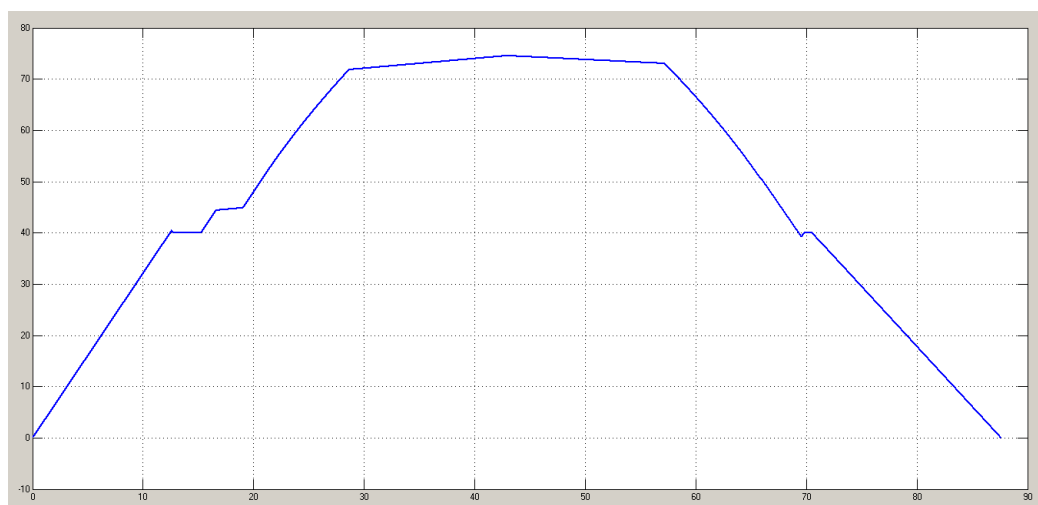


D-E

Non ottimizzata

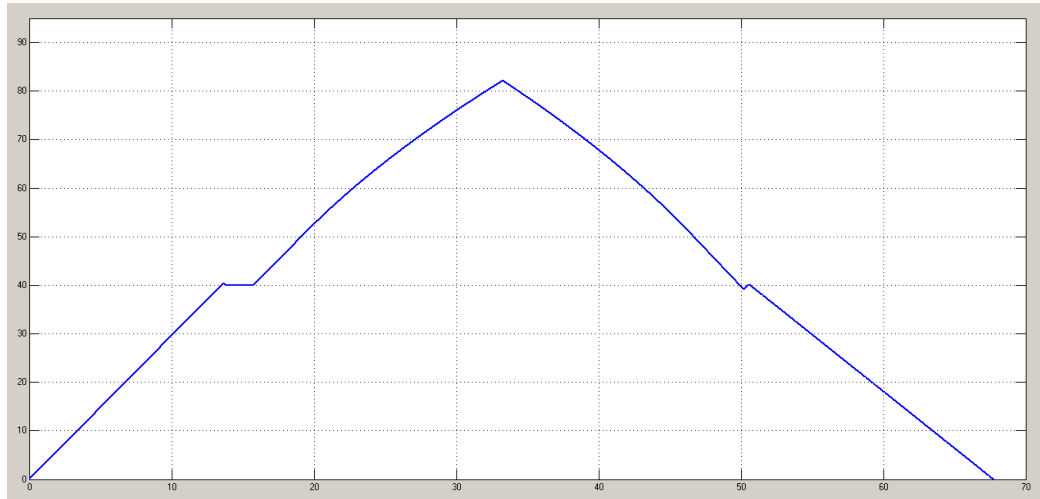


EED

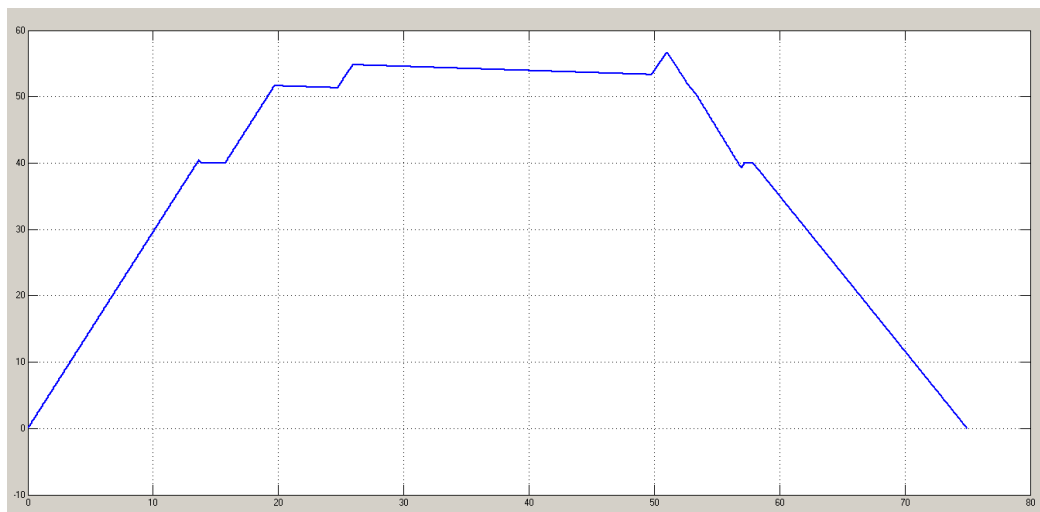


E-F

Non ottimizzata

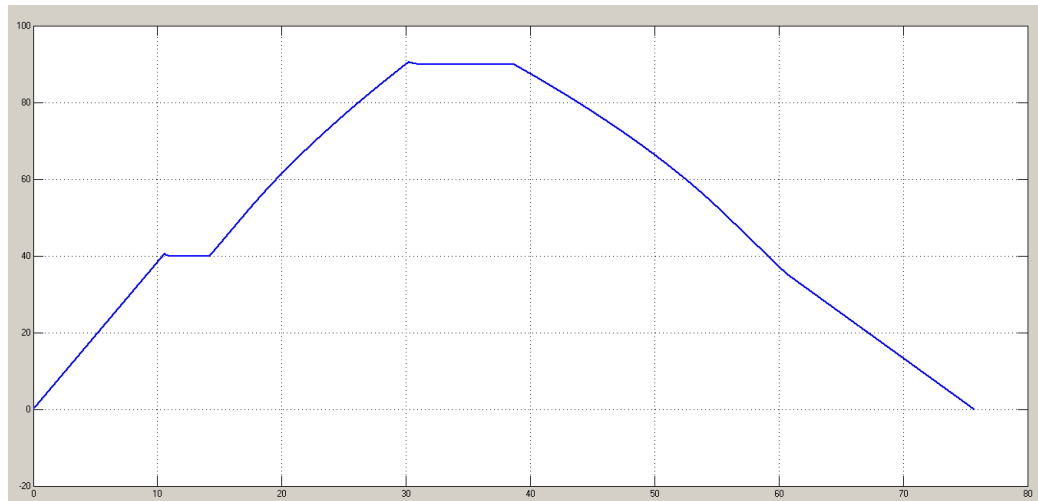


EED

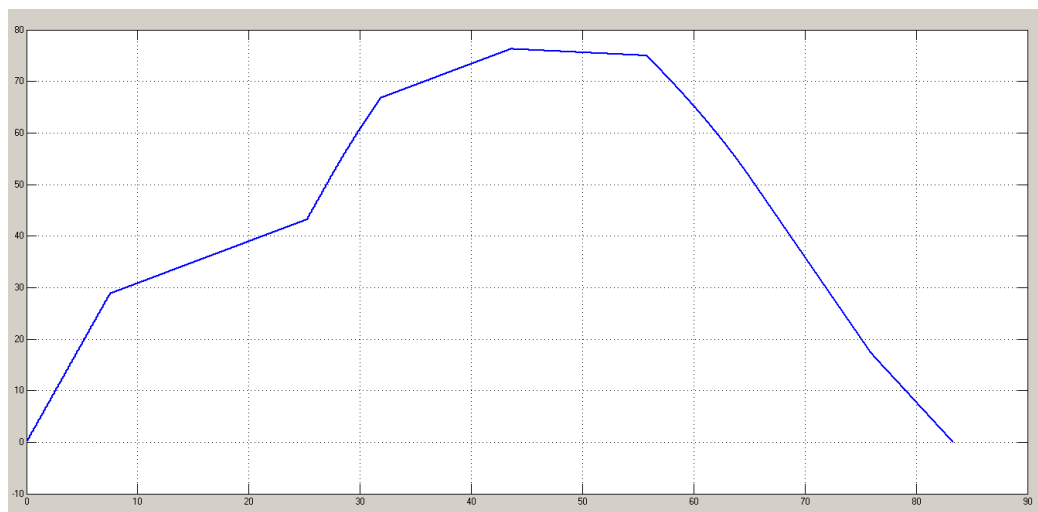


F-G

Non ottimizzata

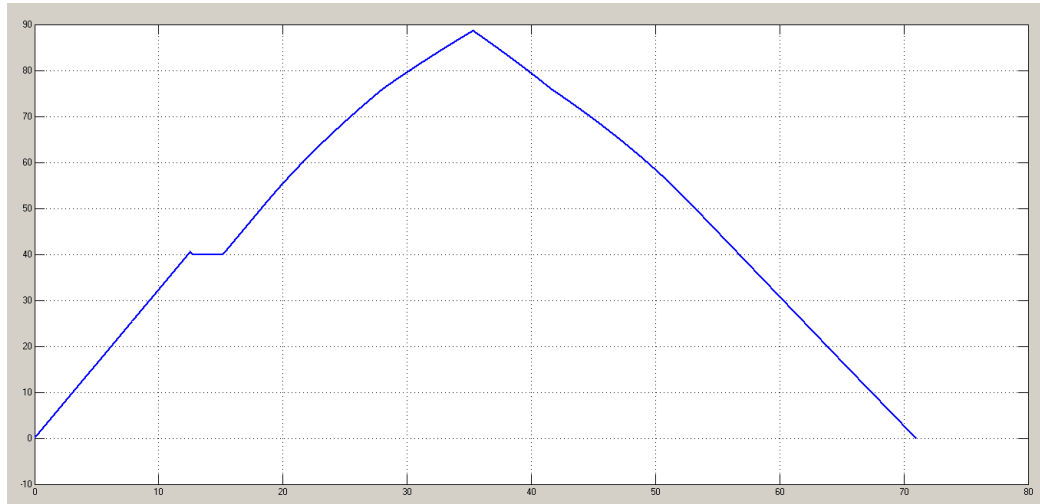


EED

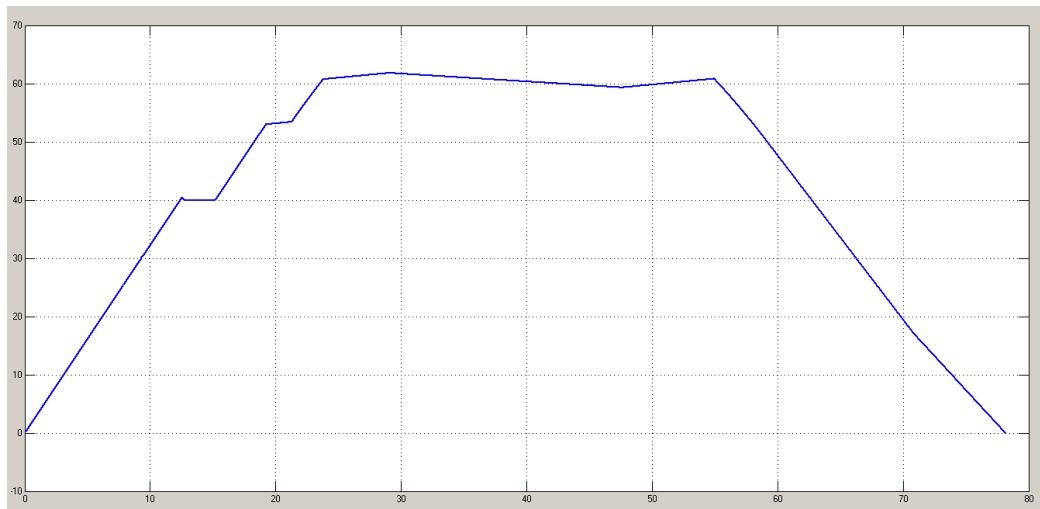


G-H

Non ottimizzata

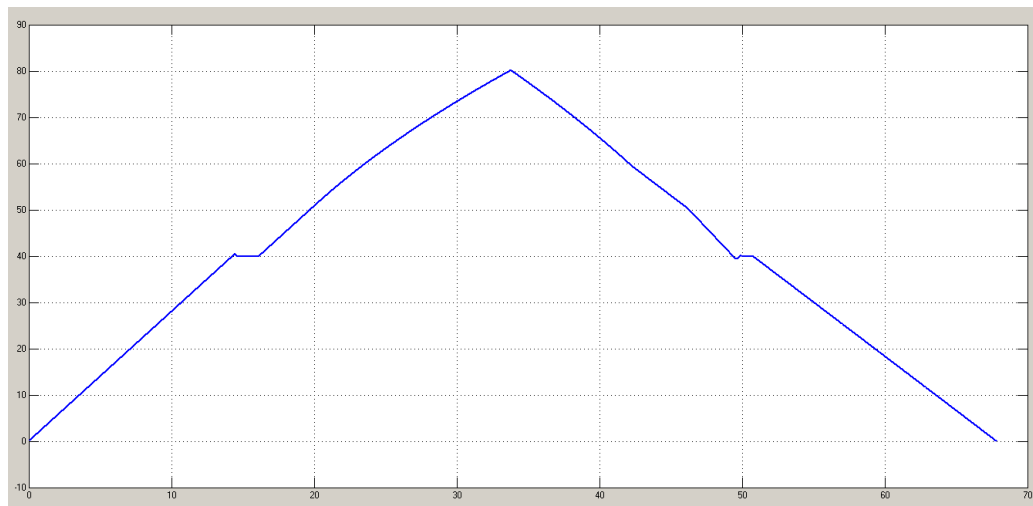


EED

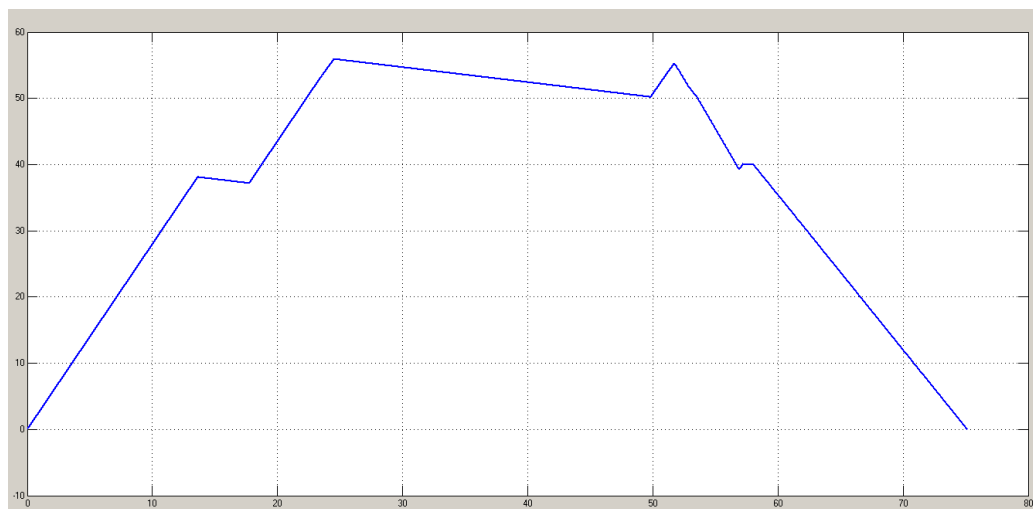


H-I

Non ottimizzata

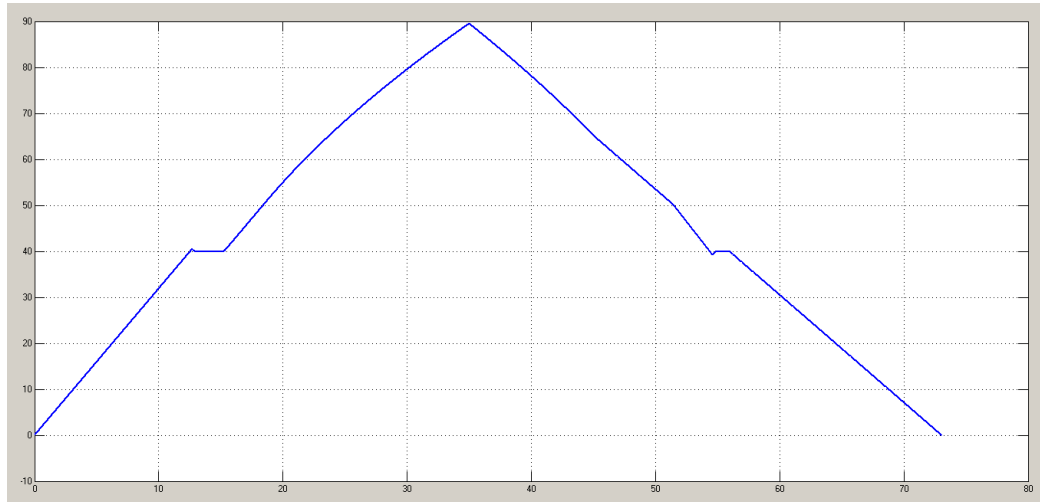


EED

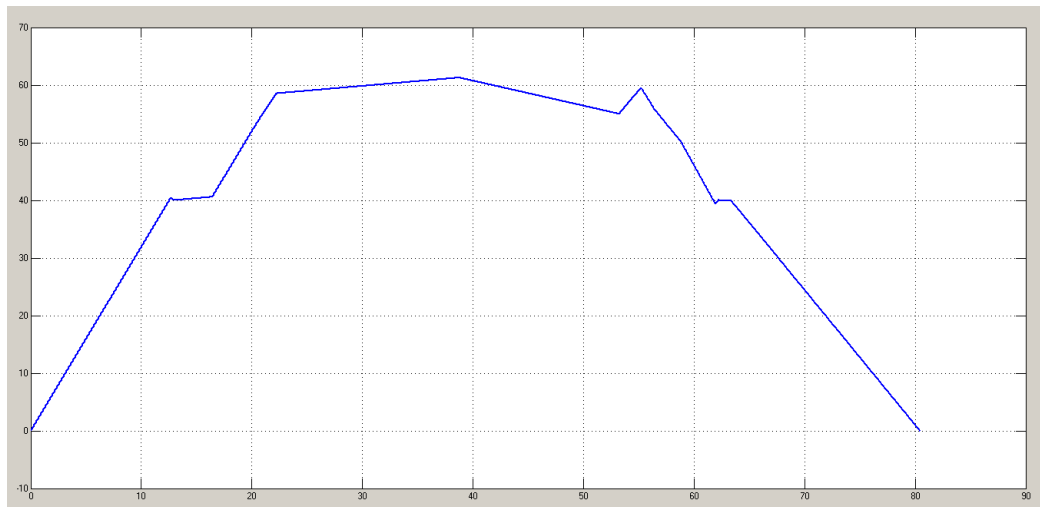


I-J

Non ottimizzata

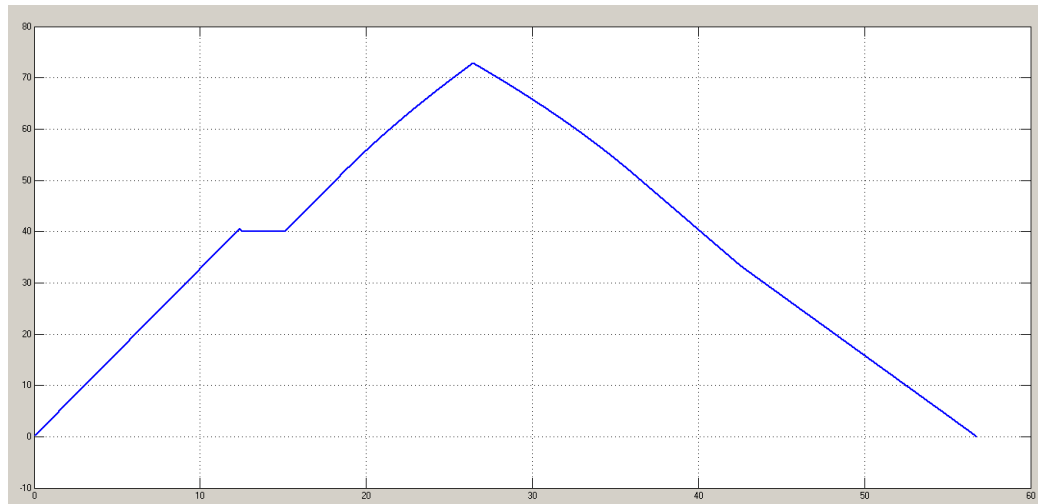


EED

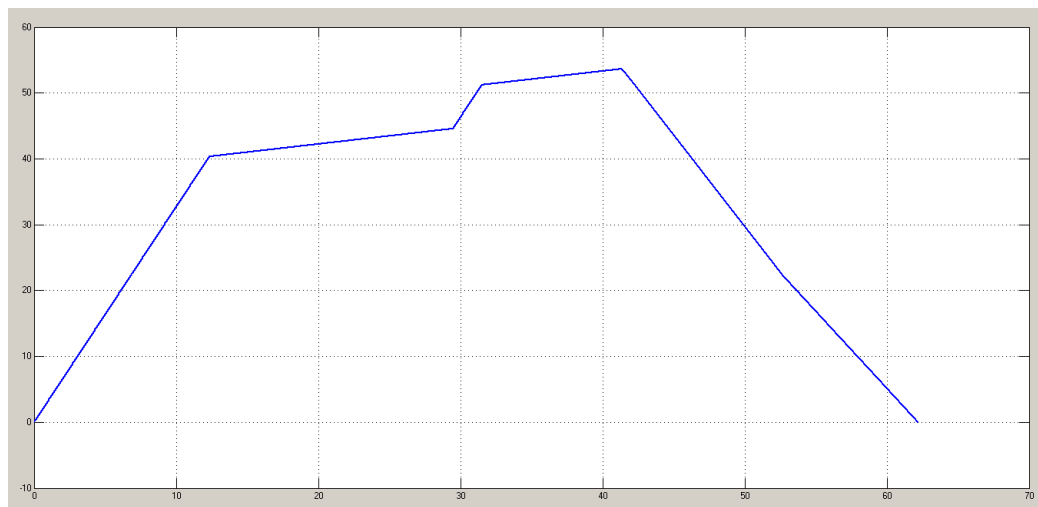


J-K

Non ottimizzata

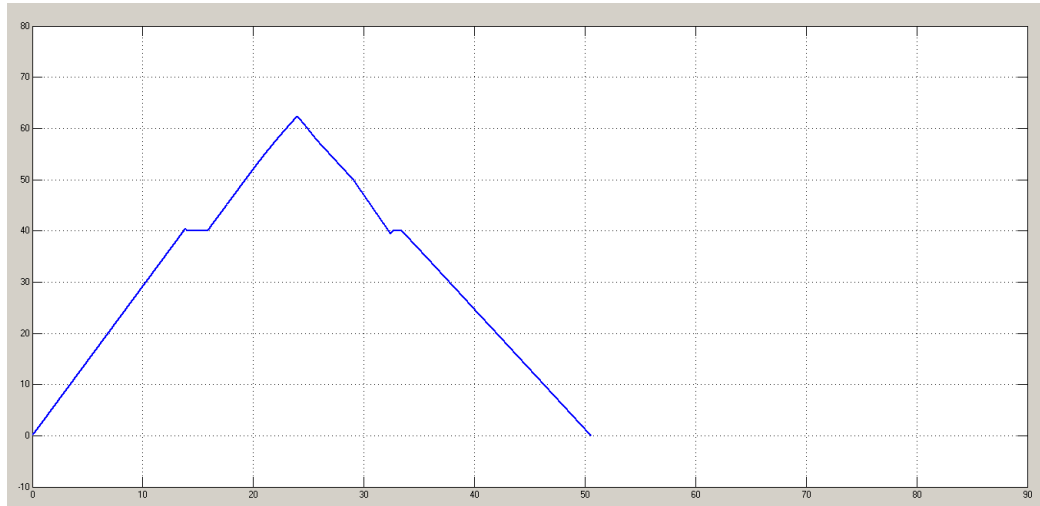


EED

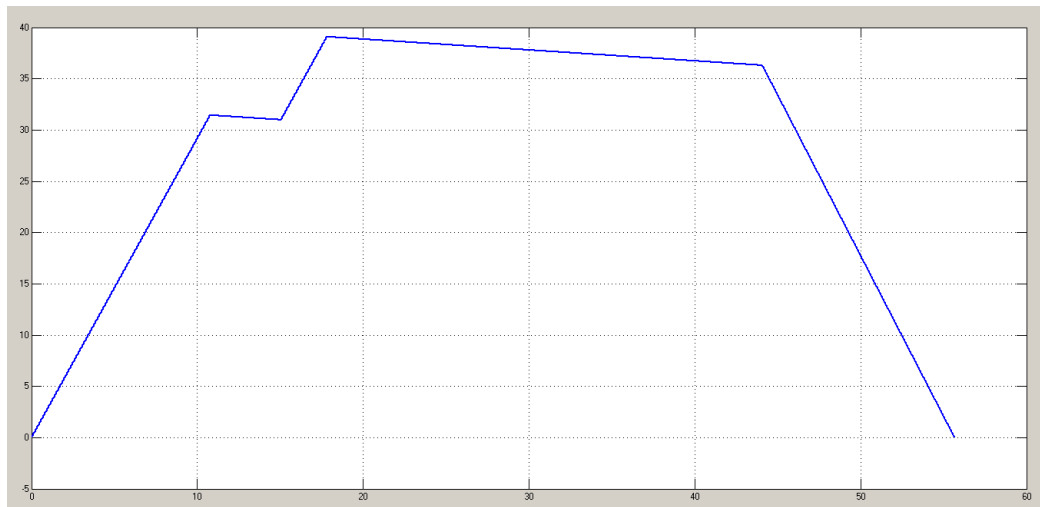


K-L

Non ottimizzata

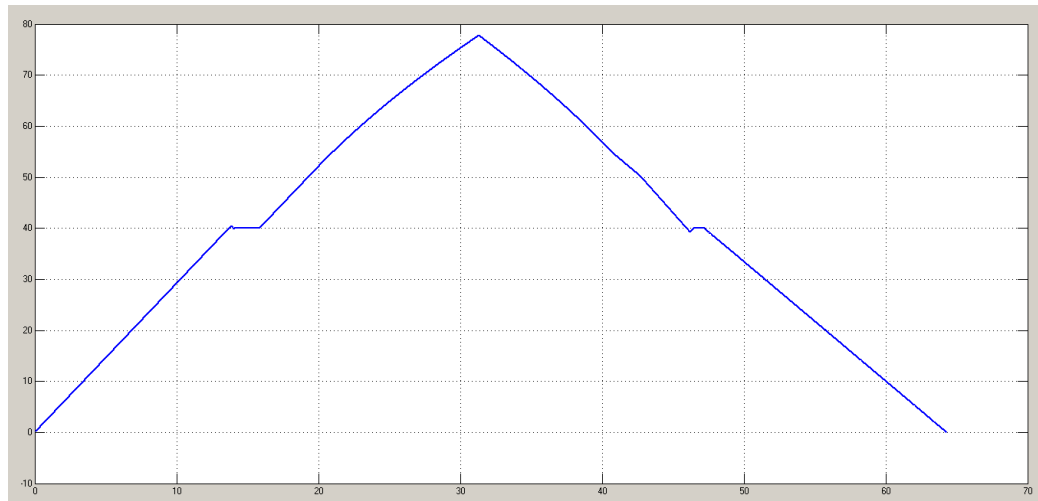


EED

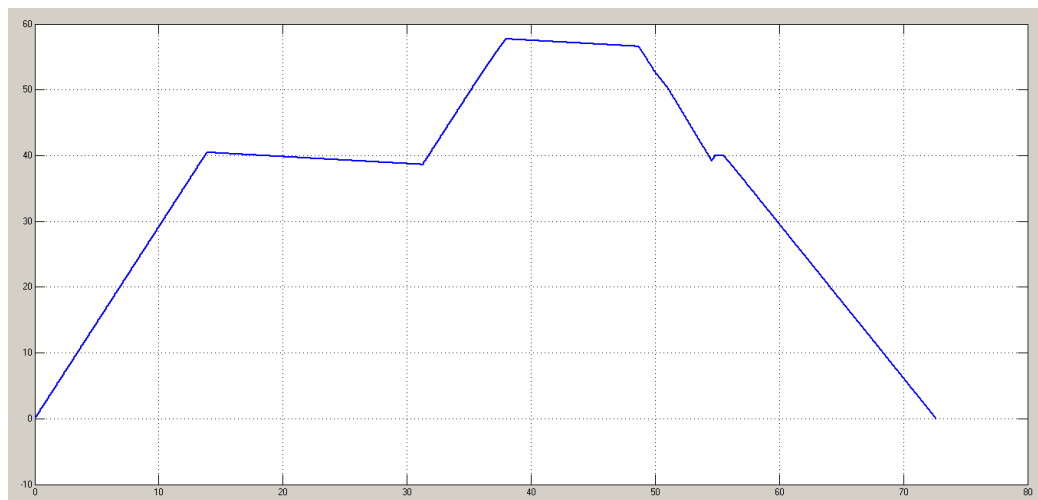


L-M

Non ottimizzata

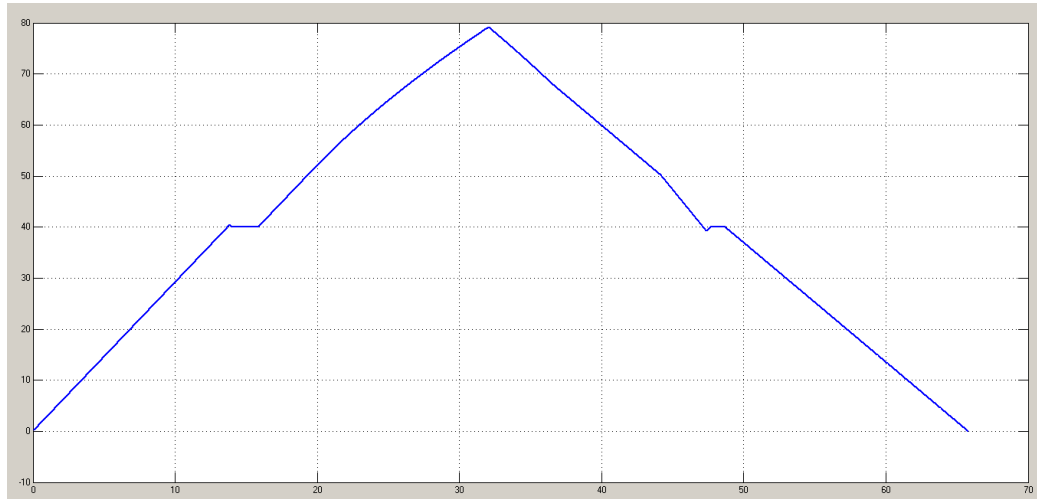


EED

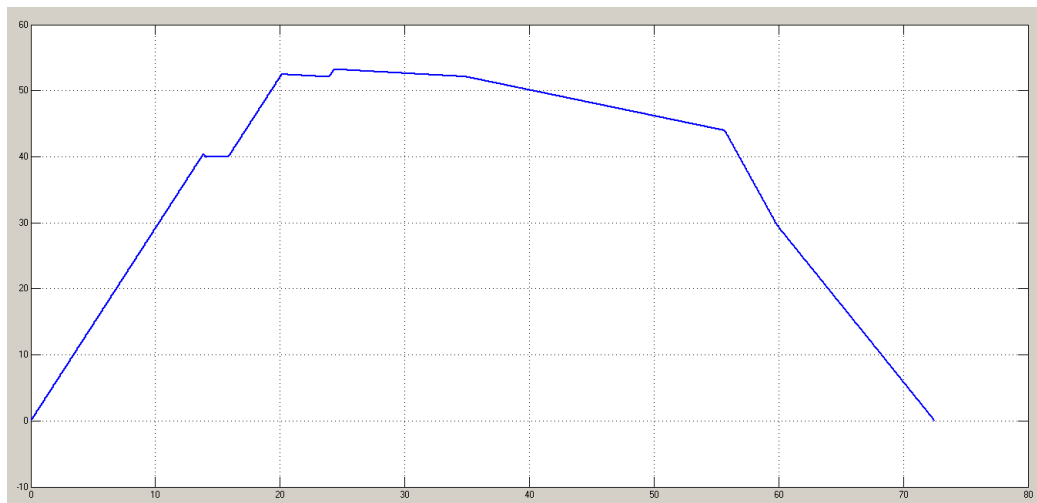


N-O

Non ottimizzata

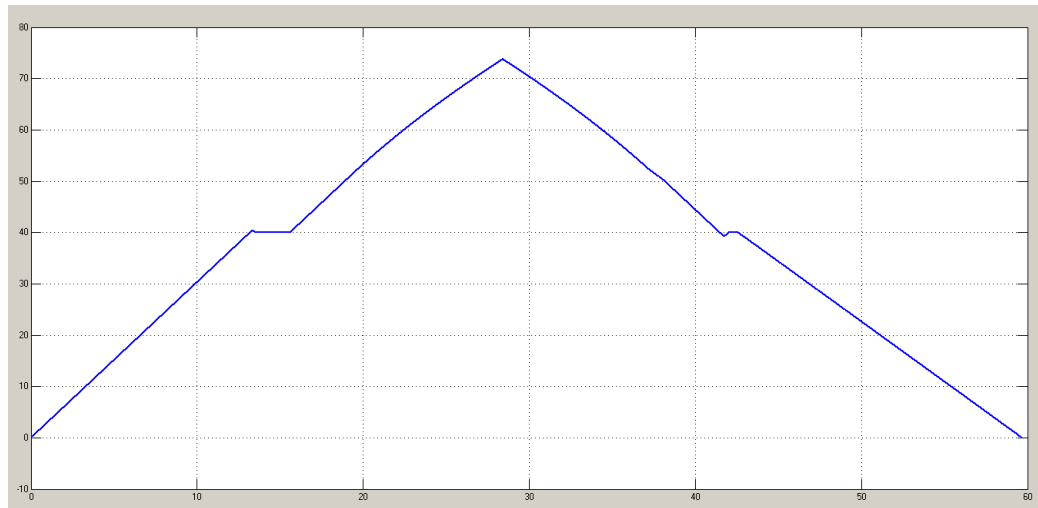


EED

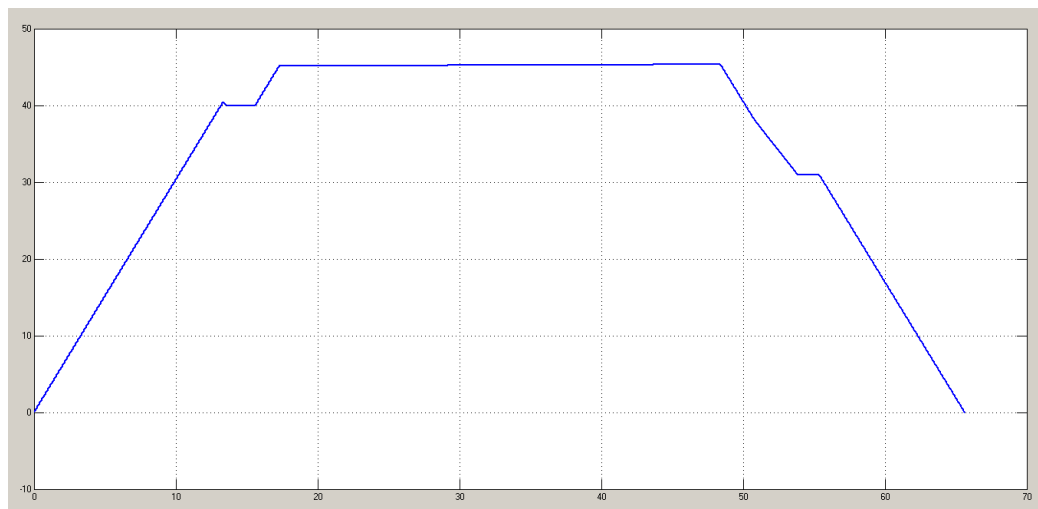


O-P

Non ottimizzata

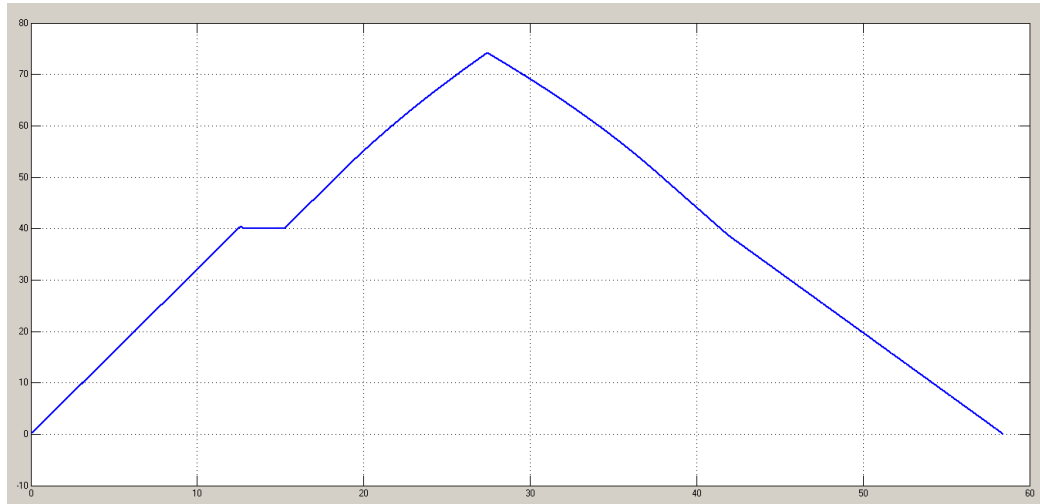


EED

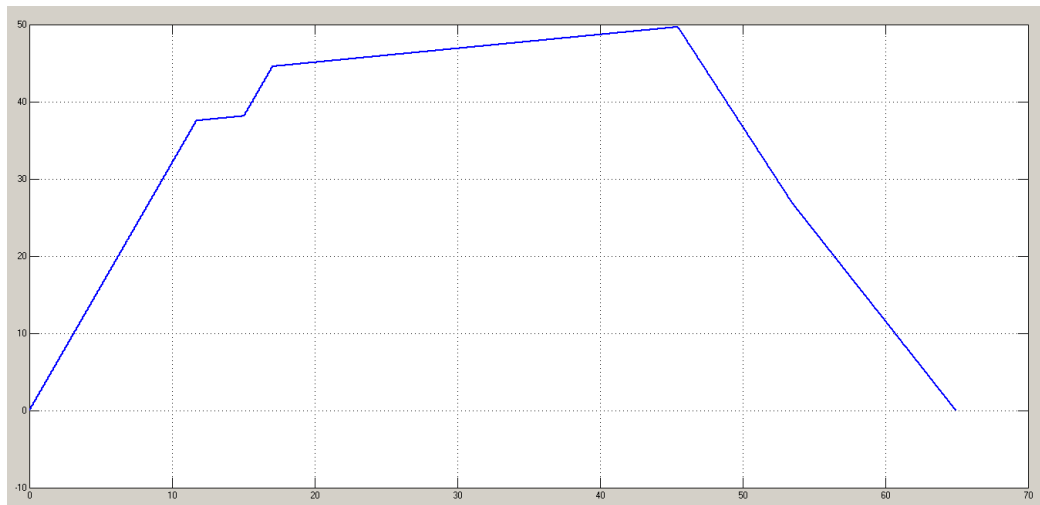


P-Q

Non ottimizzata

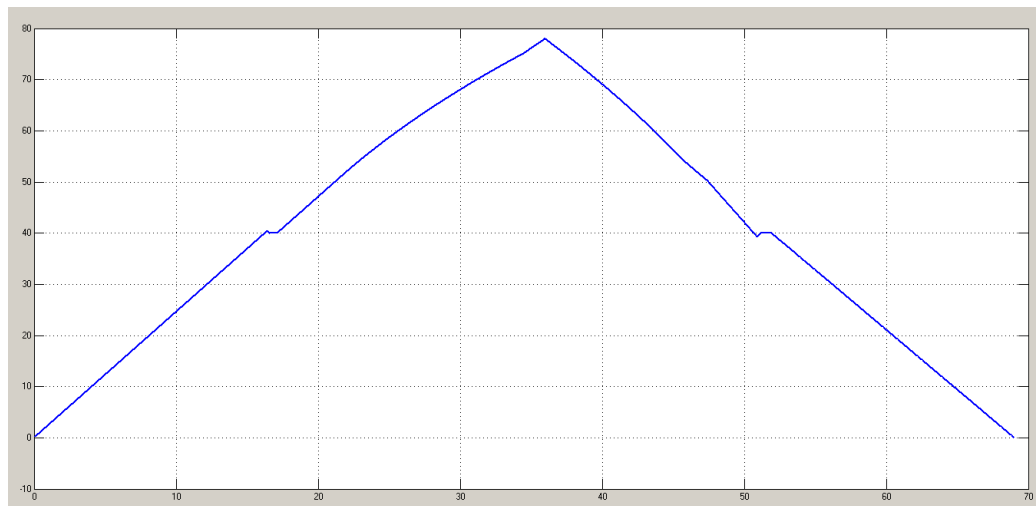


EED

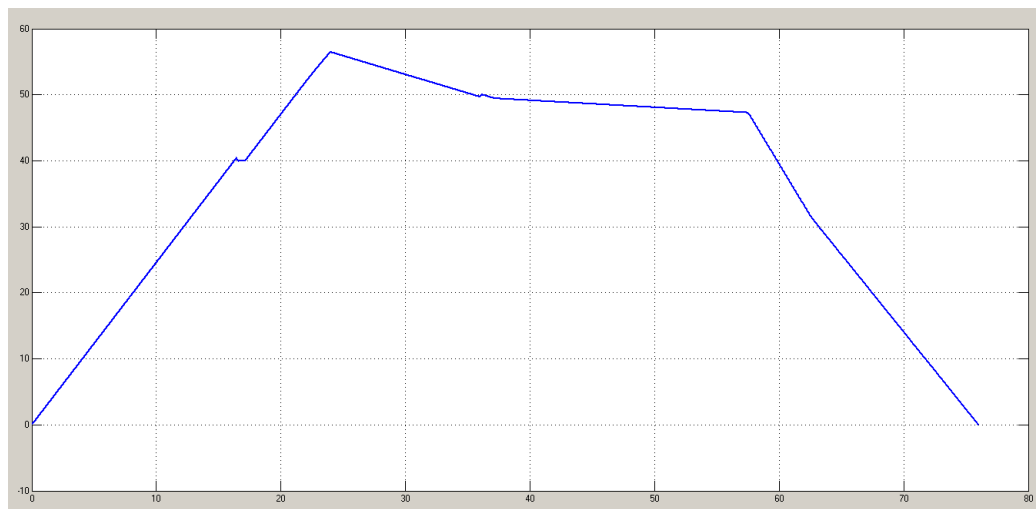


Q-R

Non ottimizzata

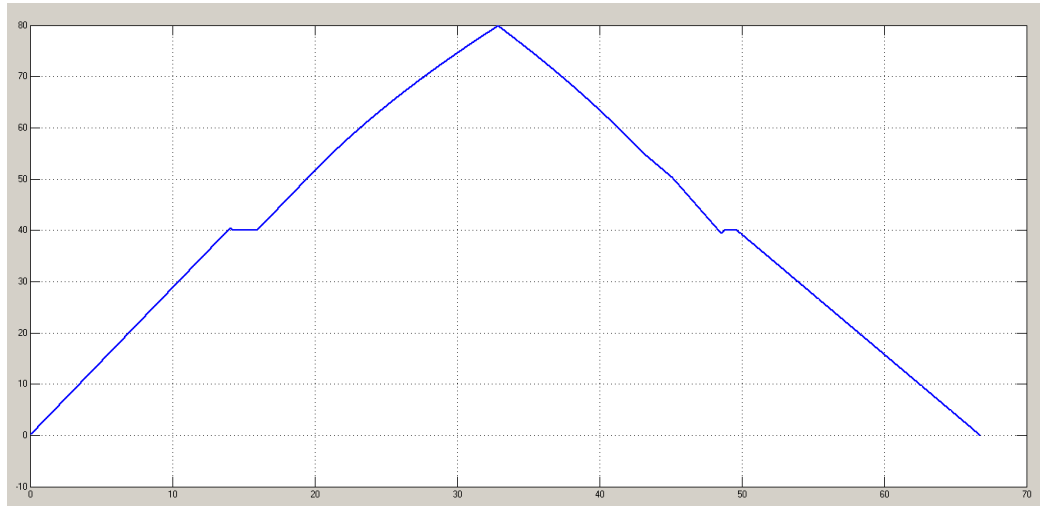


EED

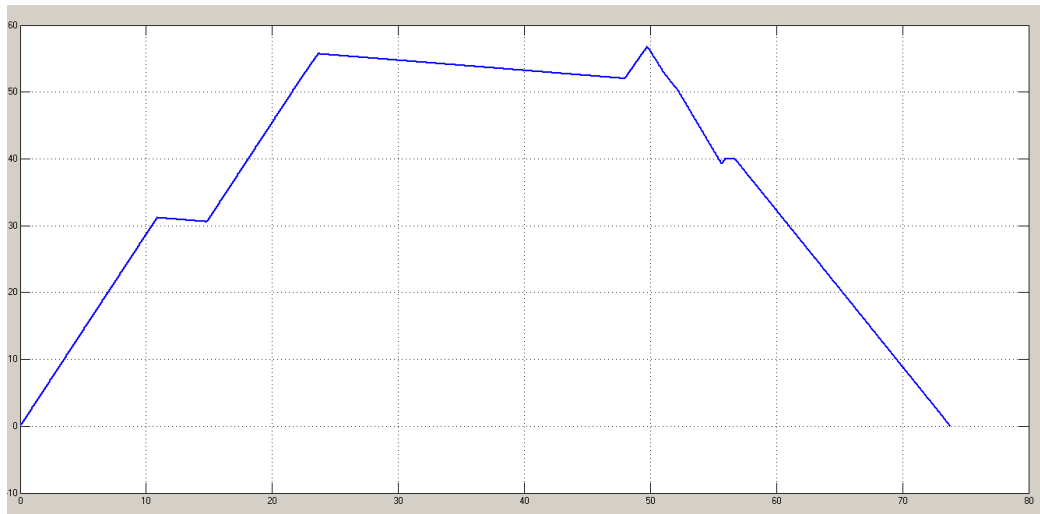


S-T

Non ottimizzata

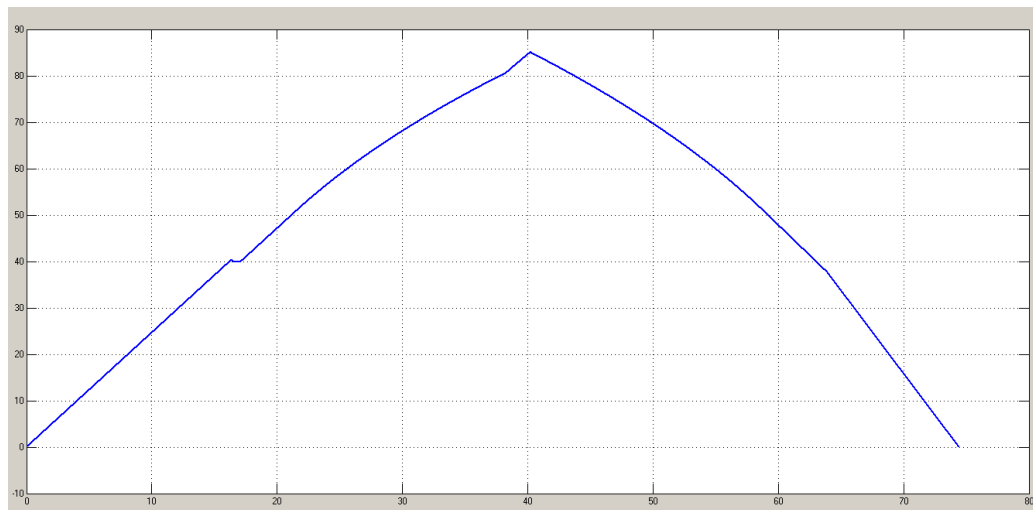


EED

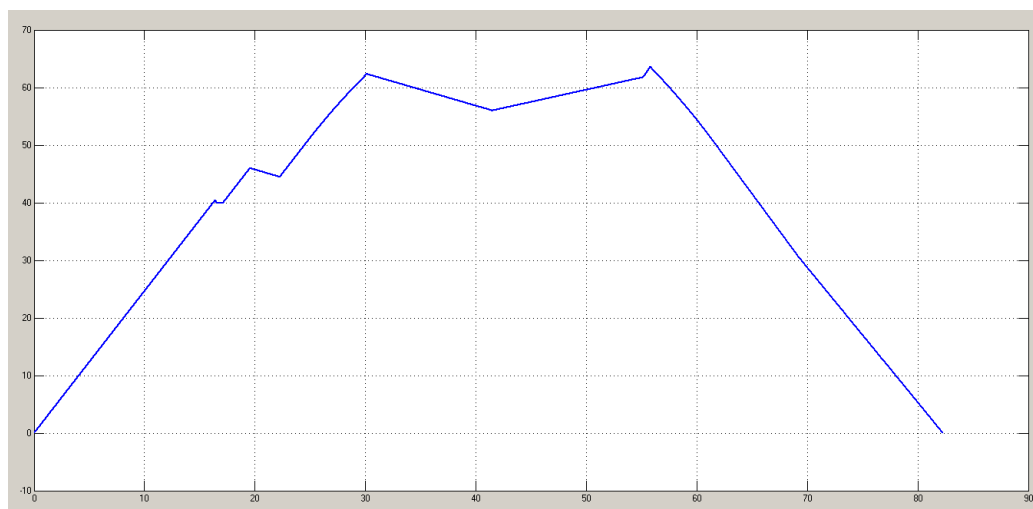


T-U

Non ottimizzata

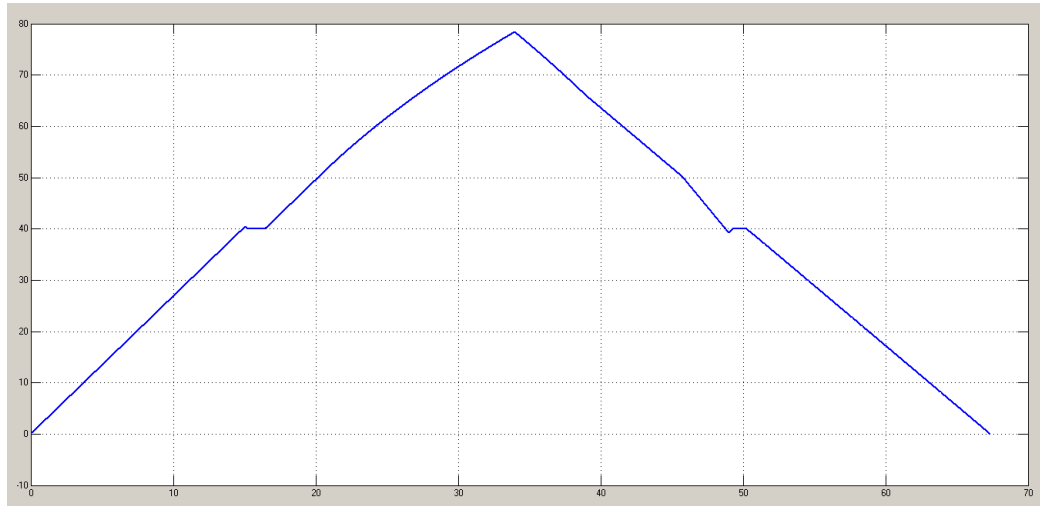


EED

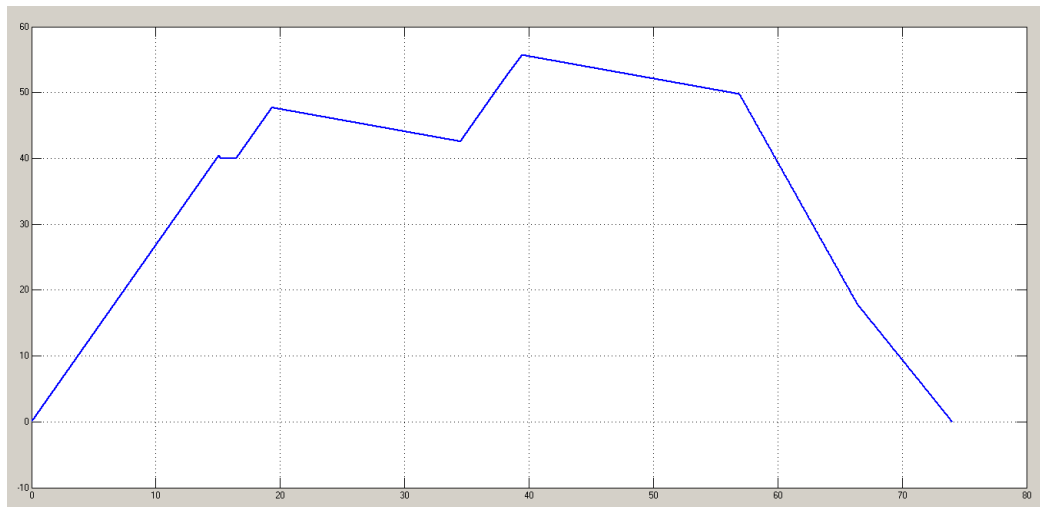


U-V

Non ottimizzata

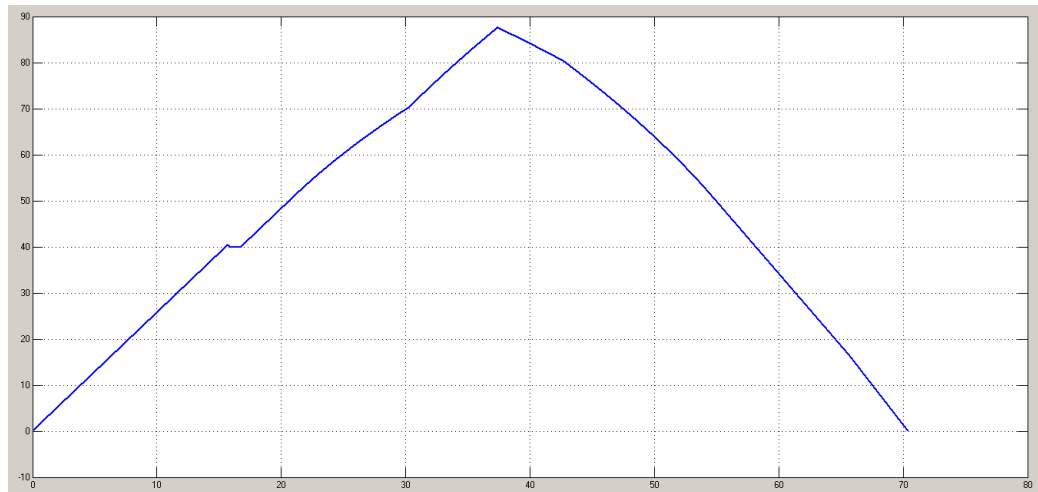


EED

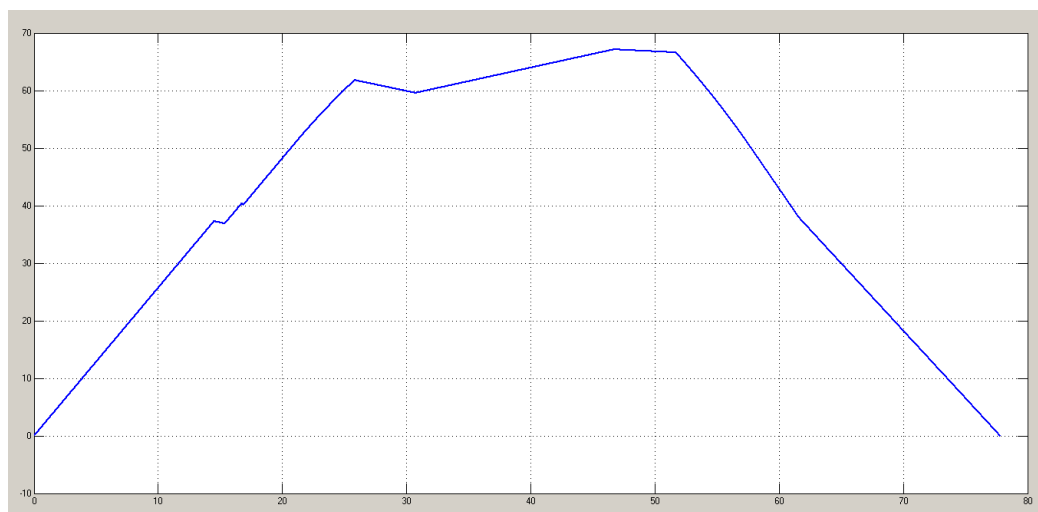


W-Z

Non ottimizzata



EED



Bibliografia

- [1] Ente nazionale di normazione UNI, Norma tecnica UNI 8379-2000 Sistemi di trasporto a guida vincolata (ferrovia, metropolitana, metropolitana leggera, tranvia veloce e tranvia) - Termini e definizioni.
- [2] Schede tecniche Ansaldo-Breda, <http://www.ansaldobreda.it/prodottieservice>.
- [3] Francesco Perticaroli; Sistemi elettrici per i trasporti, seconda edizione, Casa Editrice Ambrosiana
- [4] E. Goddard; Electric Traction systems overview of signalling and train control systems; course on electric traction systems IET professional development 2008
- [5] Roberto Turri; la metropolitana di Torino, dispense per corso sistemi elettrici per i trasporti, Università degli studi di Padova, 2008
- [6] Luo Min, Cai Zhaoyong, Zhang Jin; Study on PSD system control strategy for safety, Conference on science, engineering design and manufacturing informatization (ICSEM), 2012
- [7] Mariacristina Roscia; Sistema di automazione, dispense per il corso automazione dei trasporti, Politecnico di Milano
- [8] Sehchan Oh, Yongki Yoon, Yongkyu Kim; Automatic train protection simulation for radiobased train control system, Conference on information science and applications (ICISA), 2012
- [9] Qi Hongfeng, Xu Wei; Design of a maglev Automatic train operation system and Research on predictive control algorithm. IEEE International conference on computer science and automation engineering (CSAE), 2011
- [10] S.A. Lechelle, Z.S. Mounemne; OptiDrive: A Practical Approach for the Calculation of Energy-Optimised Operating Speed Profiles, IET Conference on railway traction systems (RTS), 2010
- [11] C.S. Chang, S.S. Sim; Optimising train movements through coast control using genetic algorithms, IEEE Proceedings – Electric power applications, 1997
- [12] Y.V. Bocharnikov, A.M. Tobias, C. Roberts, S. Hillmansen, C.J. Goodman; Optimal driving strategy for traction energy saving on DC suburban railways; IET Electric power applications, 2007