

**POLITECNICO DI MILANO**

**Scuola di Ingegneria Industriale e dell'Informazione**

**Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica**



**DIMENSIONAMENTO E  
VALUTAZIONI ECONOMICHE  
DEI SISTEMI DI ACCUMULO**

Relatore : Prof. Tironi Enrico

Tesi di laurea magistrale di:  
Alessandro Cirillo  
Matricola: 740121

Anno Accademico 2013-2014



# INDICE

Indice.....	pag.3
Indice figure.....	pag.5
Obiettivo della tesi.....	pag.10
Introduzione: possibilità di utilizzo dei sistemi di accumulo e loro caratteristiche.....	pag.12
Capitolo 1 : Tipologie dei sistemi di accumulo.....	pag.15
Capitolo 2 : Grandezze caratteristiche dei sistemi di accumulo .....	pag.37
Capitolo 3 : Dimensionamento dei sistemi di accumulo e valutazione dei costi.....	pag.45
Capitolo 4 : Metodologia per la valutazione del Dimensionamento e dei costi.....	pag.44
Capitolo 5 : Caso studio e illustrazione dei risultati.....	pag.61
Capitolo 6 : Conclusioni.....	pag.177

Fonti.....pag.181

Appendice: Stesura del programma in visul basic.....pag.183

# INDICE FIGURE

Figura 1.1- Circuito equivalente di una batteria.....	pag.25
Figura 1.2 - Batteria a volano per UPS con motore/generatore a riluttanza variabile.....	pag.28
Figura 1.3 - Schema di funzionamento di un supercapacitore a doppio strato.....	pag.31
Figura 1.4 - Supercapacitore della EPCOS.....	pag.32
Figura 1.5 – Circuito equivalente di un supercondensatore.....	pag.34
Figura 2.1 – Grafico : la percentuale di capacità disponibile in funzione della temperatura di esercizio per una batteria al piombo acido.....	pag.38
Figura 2.2 – Cicli di carica e scarica di una batteria.....	pag.40
Figura 2.3 – Grafico : le caratteristiche di scarica per una batteria al piombo acido.....	pag.40
Figura 2.4 – Grafico : differenti numeri di cicli che una batteria al piombo acido può fare a diversi DoD di esercizio.....	pag.42
Figura 2.5 – Tabella : perdita permanente di capacità influenzata dalla temperatura e dalla percentuale di carica con cui una batteria agli ioni di litio viene depositata.....	pag.43
Figura 2.6- Tabella : perdita della capacità a differenti temperature per una batteria al piombo acido, a base di Nickel e agli ioni di litio.....	pag.44
Figura 3.1 - Diagramma di Ragone.....	pag.46
Figura 5.1 - Thruster inserito nello scafo.....	pag.61
Figura 5.2 – Azipod.....	pag.62
Figura 5.3 - Costi di impianto per una batteria agli ioni di litio LTO - caso studio 1.....	pag.69
Figura 5.4 - Costi di esercizio per una batteria agli ioni di litio LTO - caso studio 1.....	pag.70
Figura 5.5 - Costi totali per una batteria agli ioni di litio LTO - caso studio 1.....	pag.71
Figura 5.6 - Costi totali per ciclo per una batteria agli ioni di litio LTO - caso studio 1.....	pag.72
Figura 5.7 - Costi di impianto per una batteria gli ioni di litio LTO senza approssimare per difetto gli anni di vita del sistema di accumulo.....	pag.77
Figura 5.8 - Costi di impianto del supercapacitore - caso studio 1.....	pag.80
Figura 5.9 - Costi di esercizio del supercapacitore - caso studio 1.....	pag.81
Figura 5.10 - Costi totali del supercapacitore - caso studio 1.....	pag.82

Figura 5.11 - Costi totale per ciclo del supercapacitore - caso studio 1.....	pag.83
Figura 5.12 - Costi di impianto del supercapacitore ibrido - caso studio 1.....	pag.87
Figura 5.13 - Costi di esercizio del supercapacitore ibrido - caso studio 1.....	pag.88
Figura 5.14 - Costi totali del supercapacitore ibrido - caso studio 1.....	pag.89
Figura 5.15 - Costi totali per ciclo del supercapacitore ibrido - caso studio 1.....	pag.90
Figura 5.16 - Costi di impianto per batteria agli ioni di litio tipo b - caso studio 1.....	pag.95
Figura 5.17 - Costi di esercizio per batteria agli ioni di litio tipo b - caso studio 1.....	pag.96
Figura 5.18 - Costi totali per batteria agli ioni di litio tipo b - caso studio 1.....	pag.97
Figura 5.19 - Costi totali per ciclo batteria agli ioni di litio tipo b - caso studio 1.....	pag.98
Figura 5.20 - Costi di impianto per batteria agli ioni di litio tipo c - caso studio 1.....	pag.103
Figura 5.21 - Costi di esercizio per batteria agli ioni di litio tipo c - caso studio 1.....	pag.104
Figura 5.22 - Costi totali per batteria agli ioni di litio tipo c - caso studio 1.....	pag.105
Figura 5.23 - Costi totali per ciclo per batteria agli ioni di litio tipo c - caso studio 1.....	pag.106
Fig 5.24 – Costi di impianto batteria ioni di litio LTO compiendo 4 cicli al giorno.....	pag.114
Fig 5.25 – Costi di esercizio batteria ioni di litio LTO compiendo 4 cicli al giorno.....	pag.115
Fig 5.26 – Costi totali batteria ioni di litio LTO compiendo 4 cicli al giorno.....	pag.116
Fig 5.27 – Costi totali batteria ioni di litio LTO compiendo 4 cicli al giorno.....	pag.117
Fig 5.28 – Costi di impianto batteria ioni di litio tipo A compiendo 6 cicli al giorno.....	pag.121
Fig 5.29 – Costi di esercizio batteria ioni di litio tipo A compiendo 6 cicli al giorno.....	pag.122
Fig 5.30 – Costi totali batteria ioni di litio tipo A compiendo 6 cicli al giorno.....	pag.123
Fig 5.31 – Costi totali per ciclo batteria ioni-litio tipo A compiendo 6 cicli al giorno.....	pag.124
Fig 5.32 – Costi totali per ciclo batteria ioni-litio tipo A compiendo 8 cicli al giorno.....	pag.128
Fig 5.33 – Costi di impianto batteria ioni di litio tipo B compiendo 4 cicli al giorno.....	pag.135
Fig 5.34 – Costi di esercizio batteria ioni di litio tipo B compiendo 4 cicli al giorno.....	pag.136
Fig 5.35 – Costi totali batteria ioni di litio tipo B compiendo 4 cicli al giorno.....	pag.137

Fig 5.36 – Costi totali per ciclo batteria ioni di litio tipo B compiendo 4 cicli al giorno.....	pag.138
Fig 5.37 – Costi di impianto batteria ioni di litio tipo C compiendo 4 cicli al giorno.....	pag.144
Fig 5.38 – Costi di esercizio batteria ioni di litio tipo C compiendo 4 cicli al giorno.....	pag.145
Fig 5.39 – Costi totali batteria ioni di litio tipo C compiendo 4 cicli al giorno.....	pag.146
Fig 5.40 – Costi totali per ciclo batteria ioni di litio tipo C compiendo 4 cicli al giorno .....	pag.147
Fig 5.41 – Costi di impianto supercapacitore compiendo 4 cicli al giorno.....	pag.155
Fig 5.42 – Costi di esercizio supercapacitore compiendo 4 cicli al giorno.....	pag.156
Fig 5.43 – Costi totali supercapacitore compiendo 4 cicli al giorno.....	pag.157
Fig 5.44 – Costi totali per ciclo supercapacitore compiendo 4 cicli al giorno.....	pag.158
Fig 5.45 – Costi di impianto supercapacitore compiendo 6 cicli al giorno.....	pag.160
Fig 5.46 – Costi di esercizio supercapacitore compiendo 6 cicli al giorno.....	pag.161
Fig 5.47 – Costi totali supercapacitore compiendo 6 cicli al giorno.....	pag.162
Fig 5.48 – Costi totali per ciclo supercapacitore compiendo 6 cicli al giorno.....	pag.163
Fig 5.49 – Costi di impianto supercapacitore ibrido compiendo 4 cicli al giorno.....	pag.167
Fig 5.50 – Costi di esercizio supercapacitore ibrido compiendo 4 cicli al giorno.....	pag.168
Fig 5.51– Costi totali supercapacitore ibrido compiendo 4 cicli al giorno.....	pag.169
Fig 5.52– Costi totali per ciclo supercapacitore ibrido compiendo 4 cicli al giorno.....	pag.170
Fig 5.53– Costi di impianto supercapacitore ibrido compiendo 6 cicli al giorno.....	pag.172
Fig 5.54– Costi di esercizio supercapacitore ibrido compiendo 6 cicli al giorno.....	pag.173
Fig 5.55– Costi totali supercapacitore ibrido compiendo 6 cicli al giorno.....	pag.174
Fig 5.56 – Costi totali per ciclo supercapacitore ibrido compiendo 6 cicli al giorno .....	pag.175

# ALTRO

Equazione 1: Formula di attualizzazione dei costi-NPV.....	pag.49
Curva1 - Curva valida per tutte le tipologie di sistemi di accumulo che lega la potenza specifica e l'energia specifica entrambi in p.u. usando come base rispettivamente la potenza e l'energia specifica massima. Curva riportata in scala semilogaritmica.....	pag.51
Curva 2 - Curva che descrive l'efficienza in funzione della potenza specifica in p.u.....	pag.52
Curva 3 - Relazione tra i numeri dei cicli di vita in p.u. e il DoD%.....	pag.54
Equazione 2 - Formula per il calcolo del costo di capitale del sistema di accumulo.....	pag.55
Equazione 3 - Formula per il calcolo del costo di esercizio del sistema di accumulo.....	pag.56
Equazione 4 - Formula per il calcolo del costo specifico per ogni ciclo.....	pag.57





## L'OBBIETTIVO DELLA TESI

Negli anni recenti, con l'aumentare della necessità di azioni che prevedono l'accumulo di energia, è diventato fondamentale lo sviluppo tecnologico di sistemi di accumulo sempre più all'avanguardia. La decisione di installare un tipo di batteria tra i vari tipi esistenti dipende ovviamente dall'applicazione peculiare a cui esso è destinato, tuttavia il problema di una scelta corretta ed economicamente conveniente rappresenta un argomento ancora poco discusso. Questa tesi ha l'obiettivo di mostrare come tale scelta dipenda da vari fattori determinabili tramite un preciso metodo. Questi fattori sono termini che definiscono la batteria (la massa, il DoD, la sua durata vitale, l'efficienza) e i suoi costi totali dovuti sia alle caratteristiche della stessa sia alle eventuali sostituzioni future che si dovranno tenere in considerazione se si vuole coprire tutto l'arco vitale dell'applicazione in oggetto. Quindi, con l'ausilio di un diagramma che illustra tutti i passaggi che occorre fare per il raggiungimento dell'obiettivo e con l'ausilio di curve specifiche trovate in modo sperimentale che dovrebbero essere fornite dai costruttori, si è potuto ricavare tutti i parametri della batteria e il costo da sostenere nel momento in cui si procede con l'investimento pianificando una soluzione piuttosto che un'altra.

Questa tesi è divisa in 7 capitoli: il primo è un capitolo che mostra le tipologie di sistemi di accumulo esistenti esaminando i differenti principi che vengono applicati. Vengono presentati anche i vari tipi di soluzioni costruttive usati per la produzione delle batterie più in uso.

Il secondo capitolo è dedicato alle grandezze caratteristiche di cui ci si avvale per definire gli attributi di un sistema di accumulo.

Il terzo e il quarto capitolo presentano i criteri su cui si basa il procedimento che porta al dimensionamento della batteria. Vengono mostrate le funzioni e le curve che sono state utilizzate per determinare le grandezze utili per il nostro metodo e quelle

equazioni che definiscono il costo di investimento nella procedura di pianificazione al fine di soddisfare le esigenze di una applicazione.

Il quinto capitolo tratta l'argomento della durata vitale della batteria e mostra i vari aspetti che bisogna tenere in considerazione quando si pianifica l'utilizzo di una batteria per un certo lasso di tempo ed è necessario effettuare delle sostituzioni.

Il capitolo sei presenta il caso studio che si è esaminato al fine di esporre i risultati ottenuti utilizzando i criteri di dimensionamento in oggetto. Infine vengono mostrati le conclusioni finali generali che se ne possono dedurre.

## INTRODUZIONE

### **Possibilità di utilizzo dei sistemi di accumulo e loro caratteristiche**

Il sistema elettrico è da alcuni anni in evoluzione da una struttura centralizzata, che vede una netta separazione tra la rete passiva dell'utente e quella attiva dei fornitori verso una struttura mista, che vede la presenza di sistemi di generazione a fonte rinnovabile e aleatoria a livelli intermedi e in prossimità dell'utenza. In questo scenario i sistemi di accumulo di energia assumono un ruolo strategico. Si è passato infatti da un utilizzo tradizionale come alimentazione di emergenza per carichi privilegiati e sistemi isolati, o alimentazione di piccoli elettrodomestici e apparecchiature portatili, fino all'impiego in una serie di applicazioni d'importanza strategica per il sistema elettrico. In primis, nella produzione e utilizzo in rete di energia elettrica, l'accumulo di essa permette di disaccoppiare temporalmente la produzione e il consumo favorendo una applicazione più valida dei sistemi di generazione a fonte rinnovabile che, per la loro natura aleatoria, hanno curve di produzione non facilmente prevedibili e spesso non coincidenti con quelle del carico. I sistemi di immagazzinamento dell'energia elettrica possono prendere la forma di batterie, aria compressa, volani rotanti, molle, acqua pompata, produzione di idrogeno e numerose altre. In rete, quindi, i sistemi di accumulo possono essere impiegati come riserva rapida e contribuire alla regolazione della frequenza di rete in presenza di generatori caratterizzati da una rapida fluttuazione della potenza, in particolare generatori eolici. Quindi, poiché molte delle energie rinnovabili (fotovoltaico, eolico, maree, etc.) sono per loro stessa natura intermittenti, l'accumulo è utilissimo, sia quando è esplicitamente necessario sia quando non è strettamente richiesto. L'idea, infatti, è di usare i sistemi di accumulo per fornire energia in maniera continuativa, salvo variazioni in base alle richieste dell'utente. In sistemi isolati o in isola virtuale l'accumulo è indispensabile per garantire la continuità della

fornitura nei periodi di mancanza di produzione da parte dei generatori (ad esempio di notte nel caso dei generatori fotovoltaici). I sistemi di accumulo opportunamente programmati possono permettere di ottimizzare lo sfruttamento delle risorse energetiche o fornendo localmente al carico la quota di potenza e di energia che la rete elettrica non potrebbe fornire (load-levelling) o fornendo la potenza richiesta dai carichi al di sopra del livello massimo stabilito dagli accordi con l'ente fornitore (peak-shaving). Inoltre l'utente può sfruttare il sistema di peak-shaving per comprare e immagazzinare energia nelle ore in cui costa di meno e rivenderla nelle ore a tariffazione più alta.

Sistemi di accumulo con specifiche caratteristiche integrati con opportuni convertitori elettronici possono essere impiegati anche con funzione di Power Quality, per proteggere il carico da perturbazioni che possono interessare la rete di alimentazione (buchi di tensione, microinterruzioni, disturbi armonici) e di proteggere al tempo stesso la rete da disturbi dovuti a rapide variazioni della potenza richiesta dal carico o alla presenza di carichi squilibrati. Le richieste di un'alimentazione elettrica di alta qualità sono aumentate sensibilmente negli ultimi anni con il diffondersi dell'automazione nei settori industriali e del terziario, dove le microinterruzioni possono comportare rilevanti perdite di produzione o una diminuzione della qualità dei prodotti o dei servizi offerti. In questi casi è inoltre importante che il sistema abbia un'elevata potenza specifica, cui corrispondano ingombri ridotti e una vita attesa (in cicli) molto elevata. I supercapacitori con potenze specifiche dell'ordine delle migliaia di W/kg e una vita attesa di oltre 500000 cicli, sono i sistemi di accumulo che meglio corrispondono a queste specifiche. Una volta determinato, per ogni singola applicazione, il fabbisogno di energia e gli eventuali picchi di potenza da coprire, si potrà notare che l'uso di un sistema di accumulo piuttosto di un altro porta a differenti configurazioni. Il tipo di tecnologia di accumulo allora diventa una scelta importante perché ad ogni scelta si otterranno diverse caratteristiche che la batteria dovrà avere tra cui una massa diversa, DoD (depth of discharge), potenza, energia specifica e durata. Queste caratteristiche portano infine a sostenere costi differenti

che, attraverso un'attenta analisi, possono essere ottimizzati a seconda del progetto che si sta realizzando. Nella prima parte della tesi vengono richiamate le tipologie dei sistemi di accumulo esistenti e le loro grandezze caratteristiche. Successivamente si parlerà brevemente sui vari modelli per ciascuna tipologia prima di trattare del corpo della tesi. Saranno quindi esposti i criteri per il dimensionamento dei sistemi di accumulo, per la valutazione dei costi e la metodologia che è stata utilizzata per ottenere i risultati finali.

# Capitolo 1

## Tipologie dei sistemi di accumulo

I sistemi di accumulo elettrico sono definibili come sistemi che immagazzinano l'energia elettrica convertendola in un'altra forma di energia (chimica, meccanica, elettrostatica, elettromagnetica).

Esistono varie tecnologie su cui sono basati i sistemi di accumulo che pertanto sono classificate, molto generalmente, in base alle differenti soluzioni fisiche di realizzazione. Si hanno dispositivi basati sulle reazioni elettrochimiche (batterie), quelle basate sui fenomeni elettrostatici (supercondensatori), quelle basate su soluzioni elettromeccaniche (volano energetico), e, infine, quelle basate sui fenomeni elettromagnetici (superconduttori e superconduttori magnetici).

Una seconda classificazione è basata sulle modalità di lavoro e sulle prestazioni che caratterizzano le tecnologie. Si hanno quindi sistemi che lavorano “in energia”, in grado di erogare potenze con autonomie di qualche ora, tipiche delle applicazioni di peak-shaving o in accoppiamento con generatori a fonti rinnovabili, e sistemi che lavorano “in potenza” in grado di erogare elevate potenze per tempi brevi (da frazioni di secondo a qualche decina di secondi) con tempi di risposta molto rapidi, adatti ad applicazioni di Power Quality. Con il peak-shaving il sistema di accumulo ha il compito di fornire il sovrappiù di potenza richiesta dai carichi al di sopra del livello massimo stabilito dagli accordi con l'ente fornitore dell'energia elettrica permettendo all'utente di non dimensionare il suo impianto sul picco di potenza e di stipulare con l'ente fornitore dell'energia un contratto con una potenza massima inferiore per lui economicamente vantaggioso. Inoltre l'utente può sfruttare il sistema di peak-shaving per comprare e immagazzinare energia nelle ore in cui costa di meno e rivenderla

nelle ore a tariffazione più alta. In alternativa un sistema di accumulo, dotato di specifiche caratteristiche e integrato con opportuni convertitori elettronici, può essere impiegato per funzioni di Power Quality. In questo caso l'obiettivo è quello di proteggere il carico da perturbazioni che possono interessare la rete di alimentazione (buchi di tensione, microinterruzioni, disturbi armonici) oppure di proteggere la rete dai disturbi dovuti a rapide variazioni della potenza richiesta dal carico o alla presenza di carichi squilibrati. Le richieste di un'alimentazione elettrica di alta qualità sono aumentate sensibilmente negli ultimi anni con il diffondersi dell'automazione nei settori industriali e del terziario, dove le microinterruzioni possono comportare rilevanti perdite di produzione. In tali applicazioni il sistema di accumulo lavora a piena potenza per brevissimi periodi (dell'ordine del secondo) per cui è necessaria un'elevata potenza specifica cui corrispondono ingombri ridotti e una vita attesa (in cicli) molto elevata.



## **SISTEMI DI ACCUMULO DI TIPO ELETTROCHIMICO**

Gli accumulatori elettrochimici, noti anche come batterie, costituiscono la tecnologia più convenzionale per l'accumulo di energia elettrica. Essi immagazzinano l'energia elettrica in forma elettrochimica, e sono caratterizzati da reazioni di conversione totalmente reversibili. Il loro funzionamento sia in fase di carica che in fase di scarica è riconducibile a reazioni elettrochimiche di ossidoriduzione.

Quando una batteria è collegata a un carico elettrico, l'elettrodo positivo (catodo) si riduce, acquistando elettroni, invece l'elettrodo negativo (anodo) si ossida, cedendo elettroni, mentre all'interno dell'elettrolita gli ioni positivi si muovono verso il catodo e gli ioni negativi verso l'anodo. Durante il processo di carica i moti degli ioni si invertono (gli ioni positivi si muovono verso l'anodo, quelli negativi verso il catodo) e gli elettrodi recuperano gradualmente il loro stato di ossidazione iniziale.

Il materiale impiegato per realizzare gli elettrodi e il tipo di elettrolita individuano la coppia elettrochimica con cui è normalmente denominato un accumulatore. Le batterie più comuni sono quelle al piombo, al nichel, zebra o ad alta temperatura, e agli ioni di litio.

### **Batterie al piombo acido:**

Le batterie al piombo acido sono le più comuni e ciò è dovuto al loro basso costo (alta reperibilità del piombo) e a buone densità di potenza ed energia per applicazioni di media taglia, di contro abbiamo una durata vitale bassa e la necessità di installare sistemi di ventilazione adeguati dal momento che in fase di ricarica si può avere la produzione di idrogeno ai morsetti. La cella elementare di un accumulatore al piombo è costituita da un elettrodo negativo di piombo metallico (Pb), un elettrodo positivo

di biossido di piombo ( $\text{PbO}_2$ ) e l'elettrolita che è una soluzione acquosa di acido solforico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) con elevata conducibilità di cariche.

Quando la batteria è nella fase di scarica, si deposita solfato di piombo ( $\text{PbSO}_4$ ) sulle piastre in forma cristallina che, proseguendo ulteriormente nel processo, diventa una polvere bianca poco solubile. Scaricandola completamente si interrompe l'attività elettrochimica della batteria stessa che potrà essere ricaricata solo fino a un livello inferiore della sua capacità nominale. Se la batteria viene lasciata scarica per molto tempo, il solfato impedirà la ricarica della batteria stessa rendendola completamente inutilizzabile (solfatazione) pertanto in caso di inattività della batteria è necessario procedere alla sua ricarica almeno una volta al mese. E' importante, a tal proposito, sapere che le batterie che non superano i 12 mesi di stoccaggio devono essere ricaricate con una corrente pari a 1/10 della capacità nominale per un periodo di tempo di almeno  $4 \pm 5$  ore.

Altra causa di guasto per una batteria è il livello troppo basso dell'elettrolita che deve sempre coprire le piastre: questo avviene per l'evaporazione dell'acqua in seguito alla reazione chimica in fase di ricarica. Se le piastre rimangono scoperte nella parte superiore, si ossidano a causa dell'ossigeno dell'aria mentre la parte inferiore è immersa in un liquido molto più acido rendendone possibile lo sfaldamento del fondo.

Una cella si considera totalmente scarica quando ai suoi capi vi è una tensione inferiore a 1,7V alla temperatura di  $25\text{ C}^\circ$ , e totalmente carica quando la tensione raggiunge i 2,3 V. Un fenomeno di cui tenere conto è l'auto-scarica che consiste in varie reazioni parassite che consumano lentamente le cariche presenti e portano nel tempo alla scarica completa della batteria.

Ne esistono due categorie: gli accumulatori aperti (VLA - Vented Lead Acid) e gli accumulatori ermetici (VRLA - Valve Regulated Lead Acid).

Gli accumulatori VLA sono caratterizzati dalla presenza di aperture che permettono l'uscita nell'ambiente circostante dei gas, essenzialmente idrogeno e ossigeno (prodotti durante la ricarica) mentre negli accumulatori VRLA, l'idrogeno prodotto

sulla piastra negativa viene convogliato verso la positiva dove si ricombina con l'ossigeno ricostituendo acqua e richiedendo così minore manutenzione, minore ingombro ed emissione di quantità di idrogeno limitate.

### **Batterie Nichel-idruri metallici:**

L'accumulatore nichel/idruri metallici è derivato da quello nichel/cadmio con la sostituzione dell'elettrodo di cadmio con una miscela di idruri metallici. L'elettrodo positivo è costituito da ossido di nichel idrato mentre l'elettrodo negativo è realizzato da leghe metalliche (Me). Questa tecnologia comporta l'uso di materie prime costose perciò questi accumulatori sono molto utilizzati nel settore delle applicazioni portatili di piccola taglia. Leggera e relativamente potente, tuttavia presenta un alto valore di auto-scarica e una modesta densità volumetrica di energia se paragonate alle batterie agli ioni di litio che lentamente la sta sostituendo in modo definitivo. Inoltre questo tipo di batteria soffre dell'effetto memoria cioè la batteria, se ripetutamente caricata prima che la loro carica sia completamente esaurita, "ricordano" la capacità energetica precedente alla ricarica dimenticando di avere ulteriore capacità energetica in aggiunta a quella fino a quel momento erogata. Se, ad esempio, partendo da una batteria completamente carica si utilizza solo il 70% della sua capacità energetica e successivamente si passa alla ricarica, il dispositivo elettrochimico diventa inconsapevole del 30% di potenzialità energetica rimasta che diventa, quindi, inutilizzabile.

### **Batterie ad alta temperatura - ZEBRA:**

La famiglia delle batterie "ad alta temperatura" comprende quella sodio/zolfo e sodio/cloruro di nichel (ZEBRA). La caratteristica di questa tecnologia è che la temperatura di lavoro della cella si aggira attorno ai 300 °C, necessari sia per mantenere allo stato fuso gli elettrodi, sia per aumentare la conducibilità

dell'elettrolita. Lo sviluppo di queste nuove tipologie di celle è stato spinto dall'esigenza di individuare coppie elettrochimiche in grado di fornire energie specifiche molto elevate senza ricorrere all'utilizzo di materiali eccessivamente pregiati e rari.

Nella batteria ZEBRA i due elettrodi si trovano allo stato fuso e sono divisi da un separatore di materiale ceramico, la  $\beta$ -allumina, che consente il passaggio ionico. Per mantenere gli elettrodi nello stato fuso, il catodo è impregnato di  $\text{NaAlCl}_4$  (sodio tetracloruro alluminato) liquefatto e, a cause delle elevate temperature di utilizzo, è necessario un sistema di controllo per ogni singola cella. La forza elettromotrice di una cella sodio/cloruro di nichel, ad una temperatura di lavoro di  $300\text{ }^\circ\text{C}$ , è pari a  $2,58\text{ V}$  ed è indipendente dallo stato di carica della cella. Per ottenere una struttura omogenea ed affidabile la cella elementare è in genere di dimensioni ridotte avendo, di conseguenza, una piccola capacità. Le reazioni che avvengono al suo interno non determinano la produzione di gas, riducendo il problema di ventilazione del locale batterie per diluire eventuali emissioni pericolose. I vantaggi di questa tecnologia sono di non soffrire né dell'effetto memoria né della solfatazione e di utilizzare materiali non tossici. Gli svantaggi sono legati al consumo dovuto all'esigenza di tenere la batteria sempre ad alta temperatura di esercizio, infatti, se questa non viene sostenuta, la batteria si scarica completamente in 6-7 giorni.

### **Batterie al litio:**

Una delle tecnologie di accumulo elettrochimico più promettente è rappresentata dalle batterie al litio, che ha avuto negli ultimi anni uno sviluppo molto rapido spinto in parte dalla possibilità di impiego per l'alimentazione dei veicoli elettrici e che ora trova le prime applicazioni anche nello stazionario. Le batterie al litio possono essere suddivise in tre categorie. Le più diffuse e tecnicamente mature sono le batterie agli

ioni di litio con elettrolita liquido (comunemente dette litio-ioni). Accanto a queste si stanno oggi diffondendo anche le celle litio-ioni-polimeriche che hanno un elettrolita solido di tipo polimerico e presentano minori rischi in termini di sicurezza.

La terza tipologia è rappresentata dalle celle litio metallo-polimeri, in cui il litio è in forma metallica allo stato liquido, che però hanno uno sviluppo limitato perché presentano maggiori problemi di sicurezza e al momento non sono commercialmente disponibili.

La ricerca nel settore delle celle al litio è molto attiva, in particolare negli ultimi anni, e si propone il miglioramento delle prestazioni, della vita attesa e dell'affidabilità utilizzando nuovi materiali. Tra i vari obiettivi vi è anche l'aumento delle capacità delle celle, infatti, al momento, il grosso della produzione delle batterie al litio è assorbito dal mercato dell'elettronica di consumo e le celle prodotte sono di taglia limitata (al massimo pochi Ah), ma, la prospettiva di sviluppo e di impiego delle celle per la propulsione dei veicoli elettrici e nel sistema elettrico, ha portato alcuni produttori a sviluppare celle di taglia medio grande (ordine della decina di Ah).

Esistono diverse tipologie di batterie litio-ioni ma sono caratterizzate da una struttura comune. L'anodo è costituito da grafite (si stanno facendo alcuni studi per sostituirla) mentre per il catodo si possono presentare diverse soluzioni che ne determinano le caratteristiche.

Le batterie al litio cobalto (LCO) presentano un'alta capacità ed energia specifica, sono quelle più usate per i dispositivi portatili, poi ci sono tutta una serie di batterie che puntano ad essere più sicure, più durature e con una maggiore potenza specifica tra cui le litio manganese (LMO), le litio fosfato (LFP), le litio manganese all'ossido di cobalto (NMC), le litio manganese all'ossido di alluminio (NCA) e quelle al litio titanato (LTO) che sono le più prestanti. Le celle litio-ioni polimerici hanno una struttura analoga a quella delle celle litio-ioni classiche ma sono caratterizzate dall'impiego di elettroliti solidi, dove gli ioni migrano attraverso un polimero composto solido. A differenza delle celle litio-ioni, che sono contenute in contenitori rigidi in metallo, le celle polimeriche hanno una struttura a fogli flessibili, spesso

pieghevoli (laminato polimerico) quindi possono essere costituite da film plastici flessibili che si adattano a tutte le forme richieste per i vari dispositivi elettronici e consentono un processo di manifattura più semplice e meno costoso. Inoltre le celle polimeriche sono avvantaggiate da uno spessore minore rispetto alle litio-ioni. Le celle polimeriche sono generalmente considerate più sicure delle litio-ioni classiche perché il loro elettrolita gelificato è meno reattivo di quello liquido e non viene rilasciato anche nelle eventualità di sovraccariche e sovra scariche.

Le celle con elettrolita liquido sono realizzate in contenitori metallici rigidi e possono essere realizzate con struttura cilindrica, prismatica, a bottone, mentre le celle polimeriche sono tipicamente piatte.

Le reazioni elettrochimiche variano a seconda delle diverse tipologie di cella che presentano una tensione a circuito aperto di norma intorno ai 3,6 V.

Le batterie agli ioni di litio possono essere costruite in una vasta gamma di forme e dimensioni in modo da riempire efficientemente gli spazi disponibili nei dispositivi che le utilizzano. Tali sistemi di accumulo sono anche le più leggere del compendio delle batterie questo perché gli ioni di litio hanno una densità di carica che è la più alta di tutti gli ioni che si sviluppano naturalmente, sono piccoli, mobili e immagazzinabili più rapidamente rispetto a quelli di idrogeno. Le batterie Li-ioni hanno il vantaggio di non soffrire dell'effetto memoria e della solfatazione, ma soffrono di una lenta perdita di capacità dovuta a un progressivo degrado. Questo sistema di accumulo non deve mai essere scaricato sotto una certa tensione per evitare danni irreversibili e, di conseguenza, deve essere equipaggiato con un circuito che spegne il sistema quando la batteria viene scaricata sotto una soglia predefinita. E' sconsigliato quindi scaricare la batteria molto profondamente in un sistema progettato per funzionare correttamente durante il normale uso. Tutte queste caratteristiche fanno sì che questo sistema di accumulo, più degli altri, deve essere progettato e non può essere venduto da solo ai consumatori se non come prodotto finito costruito per adattarsi ad un sistema particolare. Un ulteriore aspetto riguarda il fatto che la chimica delle batterie Li-Ioni non è sicura come le altre e può esplodere

se surriscaldata o caricata eccessivamente. Per tali motivi queste celle sono spesso dotate di un apparato di controllo elettronico (BMS – *Battery Management System*) per la gestione delle grandezze di cella quali tensione, corrente, temperatura, che regola la carica ed interviene nel caso in cui i parametri di funzionamento superino i limiti prefissati. Inoltre, sempre per motivi di sicurezza, le celle sono spesso dotate di contenitori metallici robusti. Gli apparati per la sicurezza includono generalmente un interruttore termico (per prevenire il surriscaldamento in caso di sovraccarico) e una linguetta di sicurezza con valvola di sfiato (per controllare la pressione interna). Si osserva quindi che i sistemi di controllo necessari occupano spazio utile all'interno delle pile oltre ad aggiungere ulteriori possibilità di guasto. Di solito, in caso di problemi a questi sistemi, la pila è resa inutilizzabile permanentemente e irreversibilmente. Un ultimo problema è l'approvvigionamento della materia prima, infatti il litio è disponibile in natura in quantità limitata e richiede processi di estrazione particolarmente complicati e costosi questo fa sì che il mercato sia in mano a pochi produttori.

Molta attenzione deve essere prestata alla gestione di batterie costituite dal collegamento in serie e/o parallelo di più celle. Il collegamento di un numero elevato di elementi comporta una serie di criticità da affrontare, infatti, per questa tipologia di applicazione è necessario l'uso di sistemi di bilanciamento delle tensioni di cella per evitare che, a causa della disomogeneità di comportamento, alcune celle si portino a lavorare con valori di tensione non ammissibili, causando situazioni di pericolo. La presenza di tali sistemi ha un forte impatto sui costi e sull'affidabilità complessiva della batteria.

Le celle litio-ioni classiche hanno un'energia specifica tra 130 – 180 Wh/kg mentre la potenza specifica può arrivare a valori di picco di 1800 W/kg (con energia specifica ridotta). Le celle litio-ioni-polimeriche hanno valori di energia specifica e densità di energia molto simili (140 – 150 Wh/kg), mentre la potenza specifica può arrivare a 2800 W/kg. Il rendimento energetico è molto elevato per entrambe le tecnologie, con valori fino al 95%. Il range di temperatura di lavoro è molto ampio, può andare da -

30 °C (per alcune celle di tipo commerciale fino a -60 °C) fino a 60 °C (la temperatura consigliata è 30 °C).

Attualmente è in corso una rilevante attività di ricerca nel settore degli accumulatori al litio concentrata sullo sviluppo di nuovi materiali di cella e di batterie di taglia maggiore (decine di kWh), per impieghi in particolare nella trazione elettrica. Le applicazioni in ambito stazionario sono al momento limitate, ma le prestazioni offerte da questa tipologia di batterie le rendono molto interessanti anche in questo campo. Ad esempio, avendo una densità di potenza molto alta e una vita attesa lunga possono essere impiegate in applicazioni di *Power Quality*. Altri settori di impiego possono essere le telecomunicazioni, UPS, in accoppiamento a generatori a fonte rinnovabile e in generale nei casi in cui è necessario ridurre gli spazi, dal momento che hanno una densità di energia e di potenza molto elevate.



## Modello matematico di una batteria:

L'analisi teorica delle caratteristiche di funzionamento dei sistemi di accumulo con batterie elettrochimiche è abbastanza complessa per i molteplici fenomeni non lineari che intervengono durante le operazioni di carica e scarica. In prima approssimazione, il comportamento macroscopico di un insieme di batterie elettrochimiche può, tuttavia, essere efficacemente rappresentato anche mediante semplici modelli matematici e le corrispondenti configurazioni circuitali. Ricerche precedenti hanno dimostrato che il comportamento di un sistema di batterie può essere caratterizzato in funzione delle correnti erogate e dello stato di carica (S.O.C.). Un semplice circuito equivalente è costituito dalla serie di un generatore di tensione  $V_B$  con una resistenza  $R_B$  variabile in funzione della corrente erogata,  $I_B$ , e dello stato di carica,  $Q_B$ . Il generatore ideale ha tensione uguale alla tensione a vuoto sul sistema di batterie

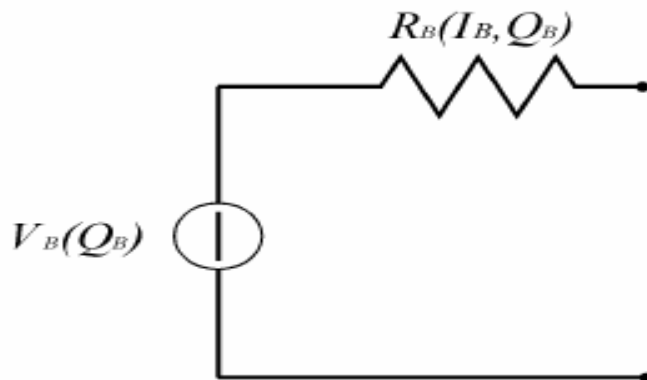


Figura 1.1- Circuito equivalente di una batteria: generatore di tensione  $V_B$  con in serie una resistenza  $R_B$  variabile in funzione della corrente erogata,  $I_B$ , e dello stato di carica,  $Q_B$ .

La resistenza equivalente variabile può essere valutata assumendo che essa sia esprimibile come una funzione polinomiale della corrente erogata, nella quale i coefficienti dipendono dallo stato di carica:

$$R_B(I_B, Q_B) = \sum v \alpha_v (Q_B) \times I_B^v$$

La determinazione dei coefficienti  $\alpha_v$  può essere difficilmente eseguita per via teorica. Dal punto di vista applicativo è opportuna la loro valutazione sulla base di valori connessi a condizioni di esercizio, memorizzate in banche dati per una successiva interpolazione. I fattori che influenzano maggiormente il valore della resistenza interna sono le dimensioni della batteria, le sue proprietà chimiche, l'età, la corrente fornita e la temperatura. In particolare si può notare che la resistenza interna diminuisce all'aumentare della temperatura perché le reazioni chimiche della batteria aumentano in velocità e aumentano con l'invecchiamento della batteria. Durante l'uso, la tensione delle batterie diminuisce fino a un valore così basso che la batteria non può essere più utilizzata, ma in realtà la diminuzione di tensione è dovuta più ad un aumento della resistenza interna che ad una diminuzione della equivalente sorgente di tensione.

# SISTEMI DI ACCUMULO DI TIPO MECCANICO ED ELETTRICO

I sistemi di accumulo di tipo meccanico (volano) ed elettrico (superconduttori e supercapacitori) sono due soluzioni che sono meno presenti rispetto a quello elettrochimico ma che presentano interessanti prospettive di sviluppo future.

## **Volano (Flywheel):**

In questo caso l'idea di base è quella di accumulare energia cinetica ponendo in rapida rotazione un volano, realizzando in questo modo una batteria inerziale. Il sistema è generalmente composto da un volano, un motore/generatore e dall'elettronica di controllo per la connessione ad una rete elettrica esterna. Una batteria a volano assorbe energia da una sorgente elettrica per caricarsi, la immagazzina sotto forma di energia cinetica rotazionale e quando serve la fornisce al carico nella forma richiesta dal carico stesso. La potenza elettrica in ingresso viene convertita dall'elettronica di controllo in un segnale appropriato per comandare efficientemente un motore a velocità variabile. Il motore fa girare il volano, che immagazzina energia in forma meccanica, accelerandolo quando accumula energia e rallentandolo quando fornisce energia al carico. Quindi affinché l'energia accumulata possa essere immessa nella rete elettrica questi dispositivi sono accoppiati a macchine elettriche reversibili. La macchina elettrica, quindi, funge da motore nelle fasi di ricarica del volano che viene portato a funzionare a un numero di giri pari a quelli nominali, mentre nelle fasi di scarica la macchina elettrica funge da generatore con la velocità del volano che decresce. Un convertitore di potenza viene utilizzato per regolare la macchina elettrica e provvedere a un funzionamento in un range operativo più ampio. L'energia immagazzinata è data dalla seguente relazione:

$$W = \frac{1}{2} * J * \omega^2$$

in cui  $W$  indica energia accumulata, espressa in [J];  $J$  è il momento d'inerzia della massa rotante ( $J=m*r^2$ ), espressa in [kg\*m<sup>2</sup>];  $\omega$  è la velocità angolare, espressa in [rad\*s<sup>-1</sup>]. Dopo aver raggiunto l'elevata velocità di regime nominale il rotore può cedere energia quando necessario e lo fa sotto forma di corrente alternata ad alta frequenza variabile. Questa corrente viene raddrizzata da un convertitore a frequenza variabile in una corrente continua che viene convertita successivamente da un inverter a frequenza fissa in corrente alternata a frequenza di rete (50 Hz). In figura è riportato lo schema di collegamento di un volano alla rete elettrica trifase.

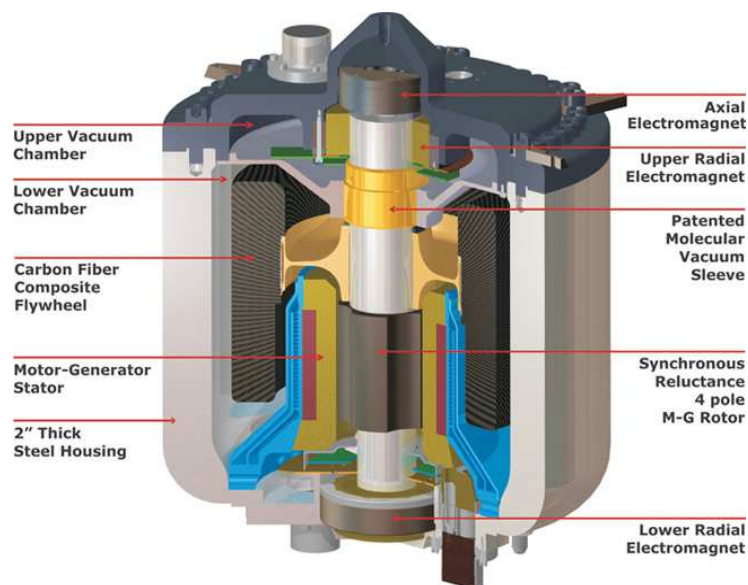


Figura 1.2 - Batteria a volano per UPS con motore/generatore a riluttanza variabile  
[\[http://www.power-thru.com\]](http://www.power-thru.com)

I volani presentano come punto di forza la bassa manutenzione, l'elevata efficienza, la lunga vita e la facile determinazione dello stato di carica. Il fattore che limita maggiormente la diffusione delle batterie a volano è il loro elevato costo iniziale e l'alto tasso di auto scarica dovuto alle perdite. I volano più performanti sono quelli a levitazione magnetica dove vengono utilizzati dei cuscinetti a magneti permanenti (PMB-Permanent magnetic bearing) che posizionati su lati opposti attraggono il rotore ottenendo così una forza rotazionale maggiore agente su di esso. Dato che l'interazione tra il rotore ferromagnetico e gli elettromagneti è instabile, la posizione del rotore deve essere misurata con dei sensori e , in base alle misure ottenute, il circuito di controllo fa scorrere una corrente adeguata nelle bobine degli elettromagneti in modo da mantenere la stabilità assiale o radiale del rotore.

Sono stati sperimentati per diverse applicazioni tra cui, nell'ambito della trazione elettrica, a bordo di tram per consentire il superamento di alcuni tratti senza l'utilizzo dei cavi di alimentazione (ad esempio le piazze nei centri storici) oppure per il recupero dell'energia in frenatura nelle metropolitane. Hanno trovato utilizzo anche nella generazione distribuita per applicazioni di PQ in cui è previsto l'ausilio di cuscinetti magnetici per ridurre l'attrito.

## **Supercapacitori:**

I supercapacitori costituiscono un'innovativa tecnologia di accumulo di energia elettrica attraverso campi elettrostatici. Essi suscitano notevole interesse perché presentano caratteristiche funzionali intermedie rispetto alle batterie elettrochimiche ed ai condensatori di costruzione tradizionale. Le batterie, infatti, sono caratterizzate da un'elevata densità di energia e da una relativamente bassa densità di potenza e sono, cioè, adatte a processi di carica e scarica lenti (durata di ore). I supercondensatori tradizionali presentano, invece, una bassa densità di energia e un'elevata densità di potenza e possono essere utilizzati, perciò, in processi di carica e scarica estremamente rapidi (durata di frazioni di secondo fino al minuto). I condensatori elettrochimici possono essere efficacemente adottati, quindi, come sistemi di accumulo di supporto per assistere le batterie elettrochimiche durante picchi di carico di breve durata (soluzione ibrida) sia per le applicazioni ai veicoli elettrici sia per applicazioni di accumulo stazionario in impianti di generazione distribuita. Il supercapacitore più semplice è formato essenzialmente da due elettrodi porosi polarizzabili caratterizzati da un elevato rapporto tra superficie e peso, immersi in una soluzione elettrolitica. Le cariche elettriche si dispongono nell'interfaccia elettrodo/elettrolita in modo fisico e non si hanno processi chimici di ossido-riduzione, ma al contempo la quantità di carica accumulabile è limitata dalla superficie degli elettrodi e dalla loro densità di carica che possono sopportare.

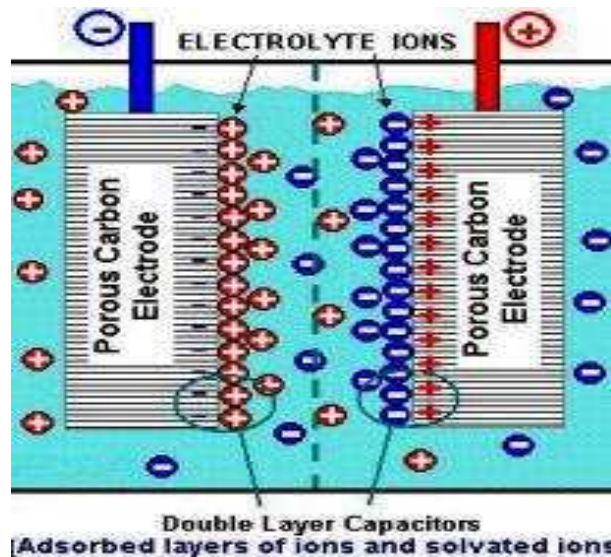


Figura 1.3 - Schema di funzionamento di un supercapacitore a doppio strato: gli ioni si dispongono nell'interfaccia tra gli elettrodi (in carbonio poroso) e l'elettrolita (in soluzione acquosa) in modo fisico. Gli elettrodi in carbonio poroso consentono alle cariche dello stesso segno di disporsi a distanze molto ravvicinate. [http:// www.electricitystorage.org]

Quando si applica una tensione ai due elettrodi, ai due lati delle superfici di interfaccia solido-liquido di ciascun elettrodo, si produce un accumulo di cariche elettrostatiche di segno opposto tenute separate (isolate) da una pellicola di elettrolita di spessore comparabile con le dimensioni molecolari (distribuzione a doppio strato). Durante il processo di formazione del doppio strato non avviene trasferimento di carica attraverso la superficie di interfaccia; la corrente che può essere rilevata è dovuta alla sola redistribuzione delle cariche in modo analogo a quanto avviene in un tradizionale condensatore a facce piane e parallele, dove la capacità fisica è esprimibile come:

$$C = \frac{A * \epsilon}{\delta}$$

dove  $\epsilon$  è la costante dielettrica del mezzo interposto tra i due strati che quantifica la tendenza del materiale a contrastare l'intensità del campo elettrico presente al suo interno,  $A$  è la superficie dell'elettrodo e  $\delta$  è lo spessore del doppio strato. I supercapacitori possono essere classificati a seconda dei materiali utilizzati per

costituire gli elettrodi, (carbone, ossidi metallici, polimeri) o per il tipo di elettrolita impiegato (organico, acquoso). Gli elettrodi più utilizzati sono quelli a base di carbonio poroso, caratterizzati da un basso costo e di alta area superficiale. Il carbonio poroso consente alle cariche dello stesso segno di disporsi a distanze molto ravvicinate, infatti, quando una carica si avvicina alla superficie della grafite, genera un dipolo indotto in grado di legare composti carichi o altamente polari. Per aumentare l'area superficiale si stanno sviluppando elettrodi composti da film di carbonio nano-strutturato con capacità di accumulo ancora superiori.

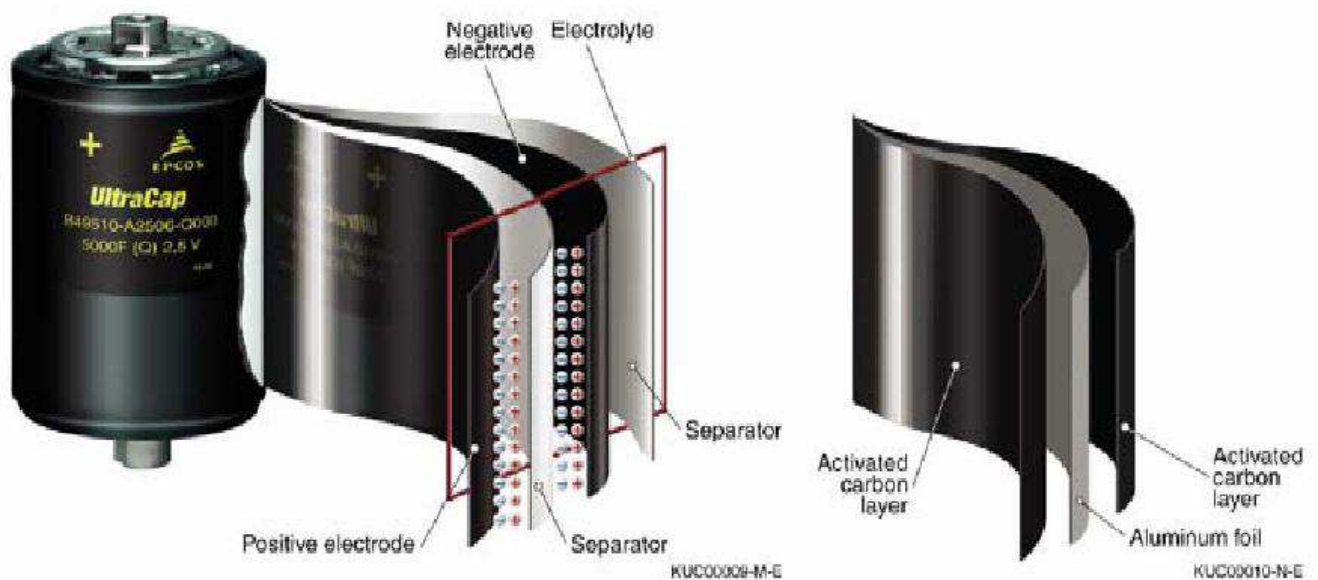


Figura 1.4 - Supercapacitore della EPCOS - Capacità: 5000F, Tensione: 2.5V [<http://www.epcos.com>]

I superconduttori offrono il vantaggio di una elevata potenza istantanea, elevata efficienza (la maggiore di tutte), sicurezza (non hanno bisogno di manutenzione) e elevato numero di cicli. Gli aspetti negativi sono i contenuti energetici relativamente bassi (quindi bisogna aumentare l'ingombro se si vuole aumentarla) e alti costi.

Bisogna sottolineare che la funzionalità del sistema e la vita utile non sono influenzate né dal numero di cicli di carica-scarica, né dalla profondità della scarica.



I supercapacitori trovano impiego in numerose applicazioni, dal settore della trazione, alla Power Quality nelle reti elettriche, per l'alimentazione dei carichi particolarmente sensibili anche a lievi anomalie nella tensione di alimentazione, all'accoppiamento con turbine eoliche e, in generale, in tutte quelle applicazioni in cui si richiedono elevati valori di potenza ma non di energia. Sono attualmente impiegati nel campo della trazione elettrica o ibrida, accoppiati a sistemi di batterie o a celle a combustibile, con lo scopo di fornire i picchi di potenza all'avviamento o durante improvvise accelerazioni e per il recupero dell'energia in frenatura. I supercapacitori, inoltre, possono essere accoppiati ai sistemi di produzione da fonte rinnovabile, con lo scopo di compensare le fluttuazioni della potenza generata, dovuta all'aleatorietà della sorgente primaria, migliorando la qualità della produzione. Pur essendo già commercialmente disponibili i supercapacitori non sono ancora tecnologicamente maturi e sono oggetto di studio da parte di vari gruppi di ricerca. Si possono prevedere buoni margini di miglioramento sia tecnologico, ad esempio mediante l'utilizzo di materiali innovativi per gli elettrodi (ad esempio materiali nano strutturati) e per gli elettroliti, sia economico.

### **Supercapacitori ibridi :**

I supercapacitori ibridi sono dei supercapacitori costituiti da elettrodi in tecnologia mista, uno di alluminio, l'altro al litio.

Il risultato ottenuto è quello di poter immagazzinare oltre il doppio dell'energia rispetto ai normali supercondensatori.

## Modello matematico di un supercondensatore:

Nella letteratura tecnica sono proposti diversi modelli per rappresentare i complicati fenomeni che avvengono in un condensatore elettrochimico. Un modello semplice, ma anche abbastanza soddisfacente, per rappresentare il comportamento dinamico di un condensatore elettrochimico consiste in una sua rappresentazione con un circuito elettrico equivalente del primo ordine. I fenomeni connessi all'accumulo di energia nella distribuzione di carica a doppio strato sono rappresentati dalla capacità  $C$ .

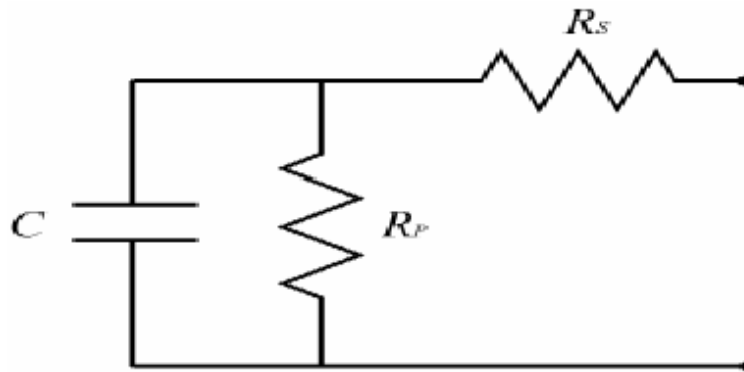


Figura 1.5 – Circuito equivalente di un supercondensatore costituito dalla capacità equivalente  $C$ , dalle resistenze  $R_p$ , per i fenomeni di auto scarica, e  $R_s$  per i fenomeni dissipativi.

La capacità equivalente  $C$  è ottenuta per via sperimentale e si calcola sottoponendo il supercondensatore ad un ciclo di scarica a corrente costante partendo da una tensione iniziale  $V_1$  fino ad arrivare a una tensione finale  $V_2$ . Viene utilizzata, quindi la formula, riportata di seguito, dove  $\Delta E$  è l'energia assorbita dal supercapacitore .

$$C = 2\Delta E / (V_1^2 - V_2^2)$$

La resistenza serie  $R_s$  tiene conto dei fenomeni dissipativi che avvengono durante i processi di carica e scarica :

$$R_s = \tau_s / C - R$$

In cui  $\tau_S$  è la costante di tempo per la scarica su un carico ohmico di resistenza  $R$ .

La resistenza parallelo  $R_p$  riproduce, invece, i fenomeni di auto-scarica che intervengono per periodi di tempo lunghi (giorni) e si può ricavare dalla costante di tempo di auto-scarica  $\tau_p$ .

$$R_p = \tau_p / C$$

Per l'analisi del comportamento del sistema di accumulo, per intervalli di tempo sufficientemente brevi la resistenza  $R_p$  può essere trascurata ed il supercapacitore può essere rappresentato come un circuito RC serie.

Per effettuare le prove di invecchiamento dei supercapacitori, vengono definite delle grandezze di riferimento che a distanza di periodi di tempo, attraverso delle misurazioni, vengono ricalcolate e confrontate con il riferimento, rendendo possibile definire l'invecchiamento del capacitore. I parametri che consentono l'analisi dell'invecchiamento di un supercapacitore sono:

- Capacità
- Rendimento energetico
- Resistenza interna

Esse vengono misurate in banchi di prova dove uno o più supercondensatori in serie, con dei circuiti di bilanciamento, sono sottoposti a tensioni e correnti di carica e scarica per ottenere le grandezze desiderate.

La resistenza interna, quindi, viene ricavata per via sperimentale e i parametri utili alla prova di resistenza interna si ricavano dall'acquisizione che viene fatta sul componente nella prova per il rendimento energetico. Viene, infatti, calcolata dalla differenza di energia tra la carica ( $E_{carica}$ ) e la scarica ( $E_{scarica}$ ), per questo è facile l'analogia con il rendimento energetico e viene ottenuta dalla formula:

$$R_{int} = \frac{E_{carica} - E_{scarica}}{I_{rms}^2 * T}$$

dove  $I_{rms}$  indica il valore efficace della corrente durante il ciclo e  $T$  la durata di esso.

## Superconduttori (SMES):

Questa tecnologia per l'accumulo energetico denominata SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage) è basata sull'accumulo di energia in forma di campo magnetico per mezzo una bobina superconduttiva mantenuta a temperatura criogenica all'interno di un contenitore isolato termicamente. La bobina viene alimentata in corrente continua, tramite un raddrizzatore che trasforma la tensione alternata di rete. Appena caricata con una corrente di alcune migliaia di ampere, la bobina viene cortocircuitata da un semiconduttore, mantenuto anch'esso a temperatura criogenica [2], permettendo la circolazione continua della corrente. L'energia immagazzinabile in questo modo può essere molto elevata e viene resa immediatamente disponibile e iniettabile rapidamente nella rete a corrente alternata (o continua) attraverso un inverter (o un raddrizzatore) ed opportuni dispositivi di controllo a commutazione. Una volta caricato l'avvolgimento superconduttivo in regime permanente non si ha dissipazione di energia elettrica nei conduttori e quindi l'energia magnetica può rimanere immagazzinata indefinitamente. Bisogna ricordare che, comunque, è necessario compensare l'energia richiesta per il mantenimento del raffreddamento siccome i materiali superconduttivi assumono resistenza nulla solo al di sotto di una certa temperatura (la soglia più alta è di - 135 °C).

L'energia immagazzinata risulta:

$$E = \frac{1}{2} * L * I^2$$

dove L è l'induttanza della bobina ed I è la corrente circolante in essa. Si ricorda che l'induttanza dipende solo da parametri geometrici:

$$L = \frac{N^2 * A * \mu}{l}$$

dove N è il numero di spire, l è la lunghezza del nucleo magnetico, A è l'area della sezione del nucleo.

## Capitolo 2

### Grandezze dei sistemi di accumulo

I sistemi di accumulo sono caratterizzati da una serie di grandezze che ne descrivono il comportamento in termini quantitativi e che sono necessarie per confrontare tecnologie di tipo diverso.

#### Capacità:

La capacità, espressa in Ah (Coulomb), è la quantità di carica elettrica che può essere estratta dal sistema durante la scarica. Nella maggior parte degli accumulatori elettrochimici questo parametro non è univoco ma dipende dal valore della corrente di scarica e dalla temperatura. La capacità nominale, dunque, è la capacità corrispondente ad un particolare regime di scarica sufficientemente rappresentativo del regime di lavoro cui la batteria è destinata e ad una temperatura di riferimento (tipicamente quella ambientale, 25 °C). La capacità tende a diminuire all'aumentare della corrente di scarica, cioè quella prelevata, mentre aumenta con la temperatura (vedi Fig. 2.1), ciò è dovuto al fatto che la resistenza interna della batteria è influenzata dalla temperatura di esercizio e tende ad aumentare al ridursi di quest'ultima. Se la batteria deve erogare la stessa prestazione ad una temperatura minore ad esempio di 20°C, deve essere usato un adeguato fattore di correzione sulla capacità richiesta. La capacità nominale si identifica andando a determinare il valore della corrente che la batteria può erogare continuamente  $I$  in un certo lasso di tempo  $T$  tale da produrre la scarica completa e raggiungere una tensione prestabilita ad una certa temperatura di esercizio.

$$C = I \times T$$

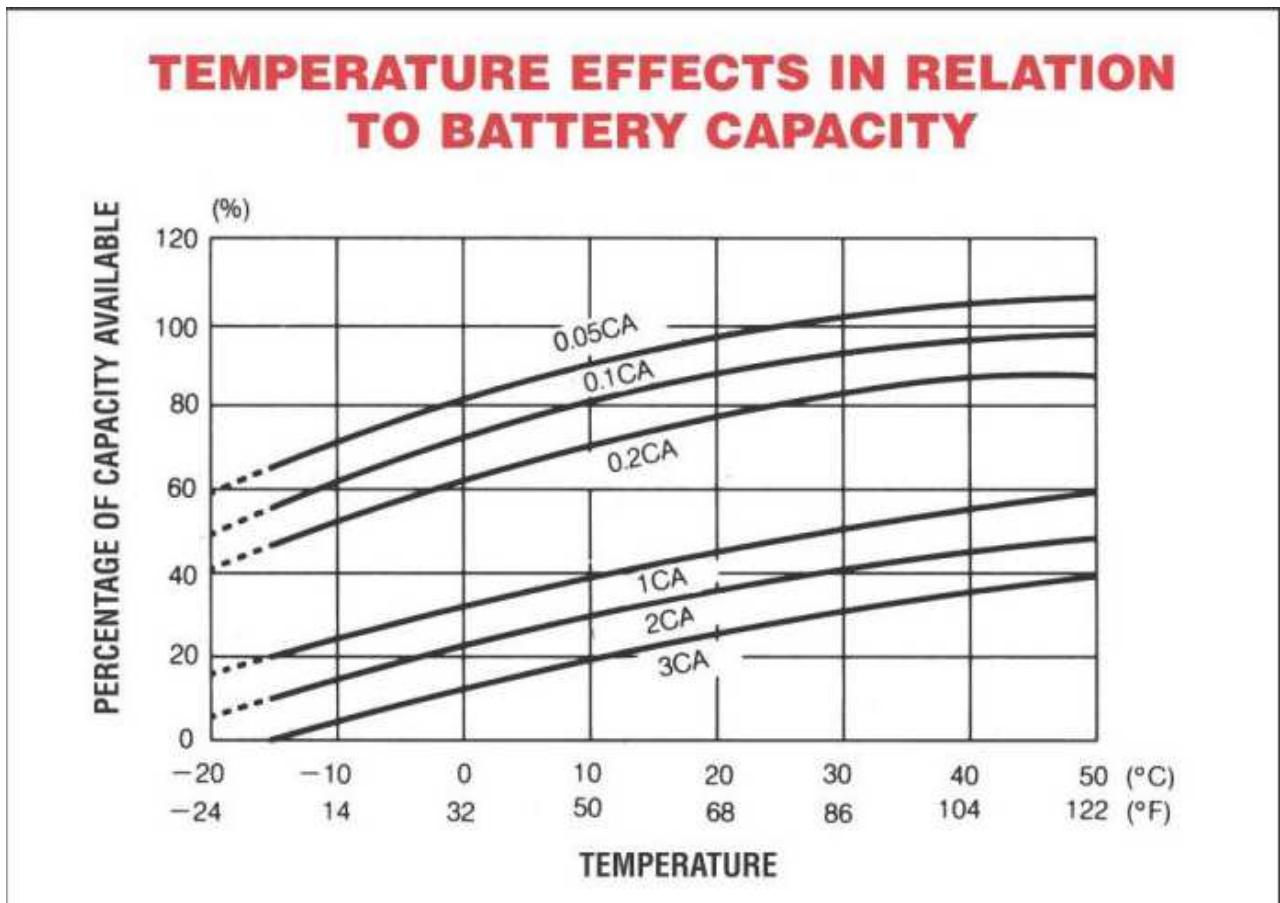


Figura 2.1 – Grafico che riporta la percentuale di capacità disponibile in funzione della temperatura di esercizio e della corrente di scarica (espressa come frazione della capacità nominale) per una batteria al piombo acido [<http://www.estrima.com>].

### Energia:

L'energia, espressa in Wh, è l'energia che il sistema, partendo da una condizione in cui è sottoposta alla tensione nominale e in cui è pienamente carica, fornisce fino alla scarica completa. Siccome la tensione può variare durante la scarica, l'energia che viene indicata è solo una stima ed è data dal prodotto della capacità per la tensione dell'accumulatore. Anche questo parametro dipende dal regime di lavoro.

Per confrontare sistemi di tipo diverso, si utilizzano o i parametri specifici quali l'energia specifica e la potenza specifica, espresse rispettivamente in Wh/kg e W/kg, oppure la densità volumetrica di potenza (Wh/L) ed energia (W/L). Il diagramma di

Ragone (che sarà ripreso in seguito), mette in relazione l'energia e la potenza specifica delle diverse tecnologie di accumulo.

### **Efficienza:**

L'efficienza energetica, o rendimento di carica/scarica, è definita come il rapporto tra l'energia scaricata e l'energia spesa per riportare il sistema di accumulo nello stato di carica iniziale. L'efficienza tende ad aumentare con la temperatura (per la riduzione della resistenza interna) e a diminuire con l'aumento della corrente di scarica perché a parità di resistenza interna si ha un aumento delle perdite ohmiche.

### **Durata di vita:**

La durata di vita è il tempo di esercizio dell'accumulatore che ha termine quando le prestazioni del sistema degradano al di sotto dei limiti operativi. A seconda delle applicazioni, questo parametro può essere espresso in anni o in cicli di carica/scarica (cicli di vita), con una profondità di scarica di riferimento generalmente tra l'80 e il 90%. Molto importante è ricordare che la durata di vita di un accumulatore dipende fortemente dalle modalità di lavoro e si riduce drasticamente se è sottoposto ad una gestione non corretta.

### **Cicli di vita:**

Il ciclo di vita della batteria è costituito dal numero totale di cicli di scaricamento-ricarica sostenibili da una batteria prima che non sia più in grado di immagazzinare una quantità utile di carica. La batteria si considera esaurita quando non è più in grado di sostenere una carica superiore all'80% della propria capacità. La gamma del voltaggio operativo rimane relativamente costante durante tutto il ciclo di vita;

tuttavia, la sua capacità comincia a diminuire in modo piuttosto lineare non appena la batteria viene messa in uso.

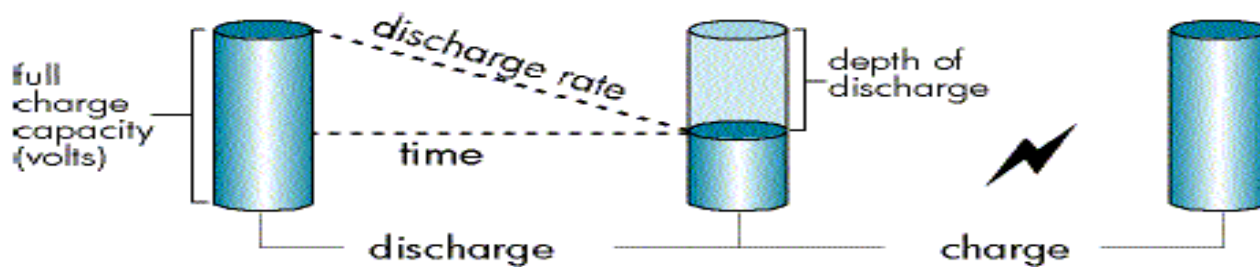


Figura 2.2 – Cicli di carica e scarica di una batteria

Il grafico della figura 2.3 mostra degli esempi di curve caratteristiche di scarica di una batteria al piombo acido:

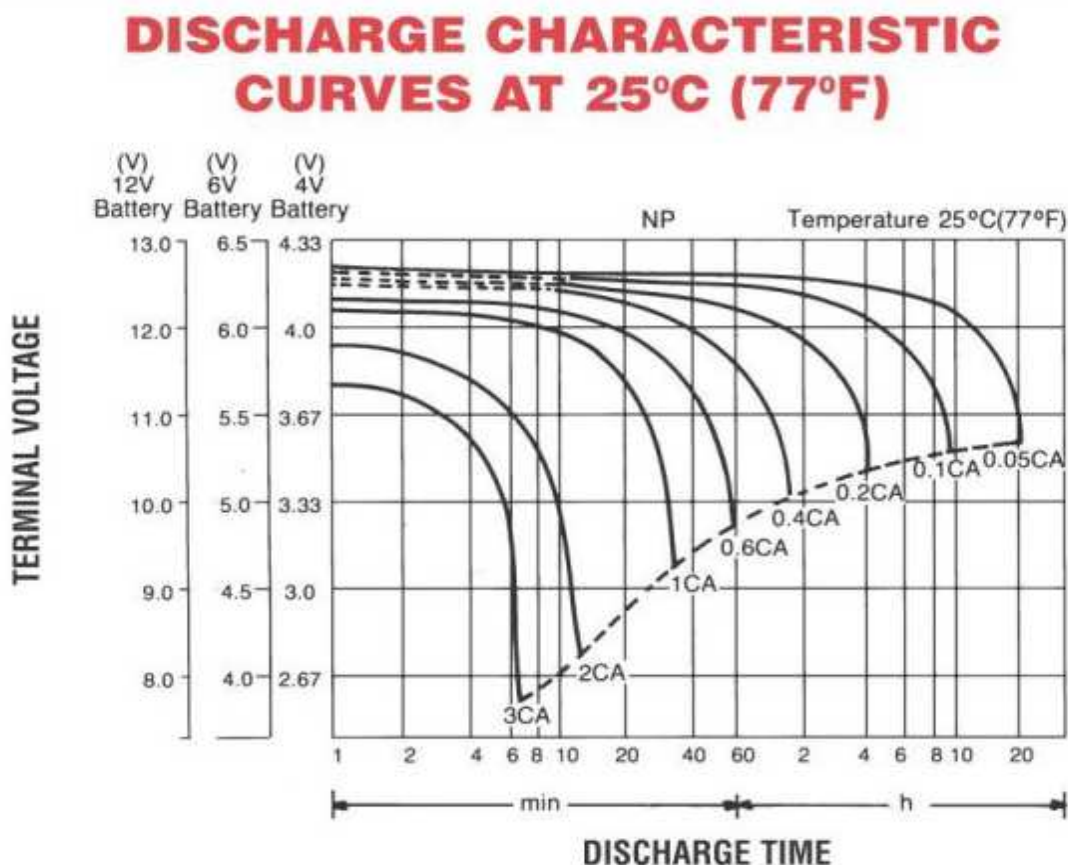


Figura 2.3 – Grafico che riporta le caratteristiche di scarica per una batteria al piombo acido. Viene riportato l'andamento della tensione ai terminali in funzione del tempo di scarica a temperatura



costante di 25°C. Vengono fornite anche le capacità residue a procedura di scarica terminata [<http://www.estrima.com>].

### **S.O.C (State of charge):**

Con SOC o "state of charge" si indica lo stato di carica attuale della batteria. Questo valore viene espresso in percentuale della capacità ed è pari al 100 % quando la batteria è totalmente carica. Il suo valore minimo raggiungibile è lo 0 % ma , nella pratica, la maggior parte delle batterie non dovrebbero scendere al di sotto di uno stato di carica del 30%, in quanto potrebbero rapidamente determinarsi delle scariche profonde che ridurrebbero la durata della batteria o, in alcuni casi, la rovinerebbero irrimediabilmente. L'effettiva capacità residua della batteria dipende da numerosi parametri, come la temperatura, l'età, la storia della batteria ecc. Tuttavia, con l'aumentare dell'età della batteria anche la capacità nominale può variare notevolmente, per cui l'indicazione sulla capacità ancora disponibile può risultare fortemente falsata.

### **DoD (Depth of discharge – profondità di scarica):**

La profondità di scarica è la frazione della capacità di una batteria che viene effettivamente rimossa durante una scarica. E' un parametro molto usato e si esprime in percentuale della capacità ed è equivalente all'inverso del S.O.C. Il numero di cicli ottenibile da una batteria dipende dalla profondità di scarica (DOD); maggiore è la profondità di scarica e minore è il numero di cicli e quindi la durata di vita delle batterie. Il grafico di figura 2.3 mostra un esempio di come il DOD e i cicli di vita siano legati tra loro per una batteria al piombo acido.

## CYCLE SERVICE LIFE IN RELATION TO DEPTH OF DISCHARGE

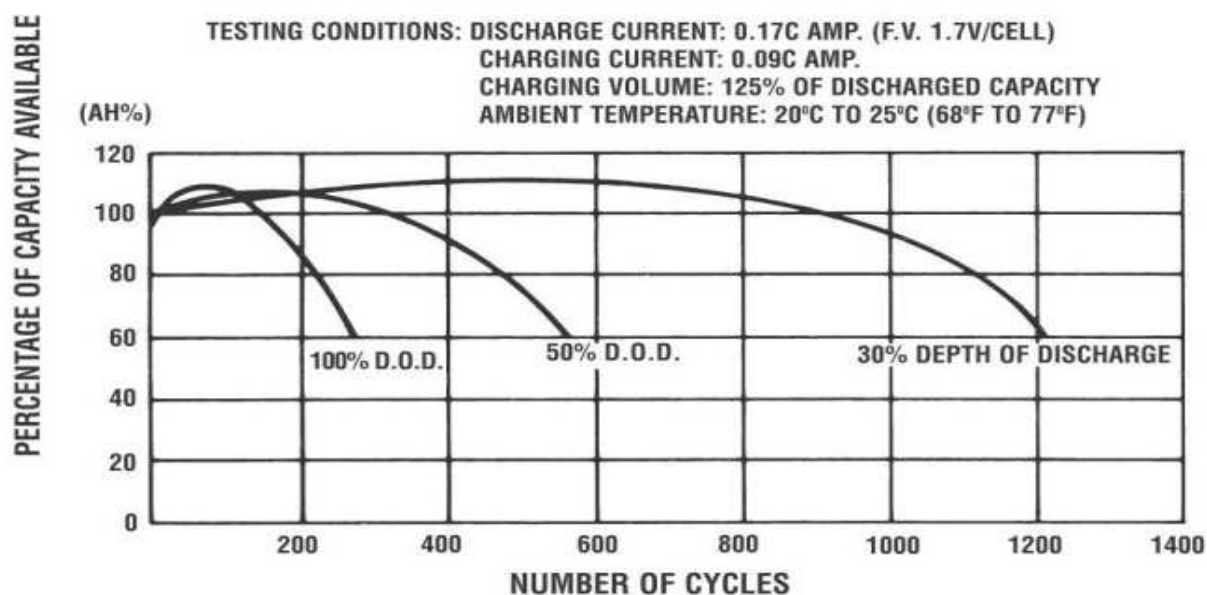


Figura 2.4 – Grafico che riporta i differenti numeri di cicli che una batteria al piombo acido può fare a diversi DoD di esercizio [http://www.estrima.com].

### Vita utile :

La vita utile della batteria è definito come il tempo in cui la batteria può rimanere inutilizzata e conservata fino a che non perde l'80% della propria capacità iniziale.

### Calendar life :

La calendar life è definita come la durata vitale della batteria prima del suo degrado dovuto ad un suo uso minimo o assente (praticamente a circuito aperto). Quindi la capacità di carica della batteria cala nel tempo indifferentemente se la batteria viene utilizzata o meno. Per determinare la vita in scaffale sono stati progettati numerosi test in cui si è riscontrato che, i fattori più rilevanti che contribuiscono al decadimento

della batteria possono essere la perdita esterna di elettroni dovuta alle povere proprietà isolanti dell'involucro, la corrosione dell'anodo o la riduzione del catodo da parte dell'elettrolita e il calore. Quest'ultimo fattore è il principale nemico della batteria e anche piccoli aumenti di temperatura ne determinano le prestazioni influenzando la velocità sia delle reazioni chimiche desiderate ma anche quelle indesiderate che provocano una perdita permanente irreversibile della capacità. La vita di scaffale della batteria quindi può variare in modo significativo a seconda della temperatura di conservazione. La tabella di figura 2.4 mostra la perdita di carica permanente che si verifica immagazzinando una batteria agli ioni di litio per differenti percentuali di carica e a differenti temperature di deposito.

<b>Perdita Permanente di Capacità contro Condizioni di Immagazzinaggio</b>		
<b>Temperatura di deposito</b>	<b>40% di Carica</b>	<b>100% di Carica</b>
<b>0 °C (32 °F)</b>	<b>2%</b> di perdita dopo 1 anno	<b>6%</b> di perdita dopo 1 anno
<b>25 °C (77 °F)</b>	<b>4%</b> di perdita dopo 1 anno	<b>20%</b> di perdita dopo 1 anno
<b>40 °C (104 °F)</b>	<b>15%</b> di perdita dopo 1 anno	<b>35%</b> di perdita dopo 1 anno
<b>60 °C (140 °F)</b>	<b>25%</b> di perdita dopo 1 anno	<b>40%</b> di perdita dopo 3 mesi
<i>Source: batteryuniversity.com<sup>[8]</sup></i>		

Figura 2.5 - Tabella che mostra come la perdita permanente di capacità viene influenzata dalla temperatura e dalla percentuale di carica con cui una batteria agli ioni di litio viene depositata

Dalla tabella soprastante si può notare che la perdita di capacità rallenta se la batteria viene depositata al 40% di carica piuttosto che al 100%. Si conclude che l'immagazzinamento causa sempre il deterioramento ma una bassa temperatura e un parziale stato di carica (SOC) rallentano il processo. La tabella di figura 2.5 dimostra che quanto detto vale anche per gli altri tipi di batterie.

Temperature	Lead acid at full charge	Nickel-based at any charge	Lithium-ion (Li-cobalt)	
			40% charge	100% charge
0°C	97%	99%	98%	94%
25°C	90%	97%	96%	80%
40°C	62%	95%	85%	65%
60°C	38% (after 6 months)	70%	75%	60% (after 3 months)

Figura 2.6- Tabella che mostra la perdita della capacità a differenti temperature per una batteria al piombo acido, a base di Nickel e agli ioni di litio

## Capitolo 3

### **Dimensionamento dei sistemi di accumulo e valutazione dei costi**

Nella maggior parte delle applicazioni, i sistemi di accumulo più usati sono quelli di tipo elettrostatico ed elettrochimico poiché rappresentano tecnologie più consolidate a differenza di quella elettromeccanica. Queste categorie sono rappresentate dalle :

- celle al combustibile
- batterie al piombo acido
- batterie al Nichel-idruro di metallo (Ni-MH)
- batterie ZEBRA
- batterie ioni-litio
- Supercondensatore e SMES.

Lo strumento più usato per confrontare i vari sistemi di accumulo è il diagramma di Ragone in cui ogni soluzione tecnologica è caratterizzata da un'area che confina valori di energia specifica e potenza specifica. Una descrizione completa delle caratteristiche di un sistema di accumulo viene ovviamente fornita dai cataloghi che ci permettono di vedere quale tecnologia soddisfa i requisiti del sistema di interesse.

## Diagramma di Ragone

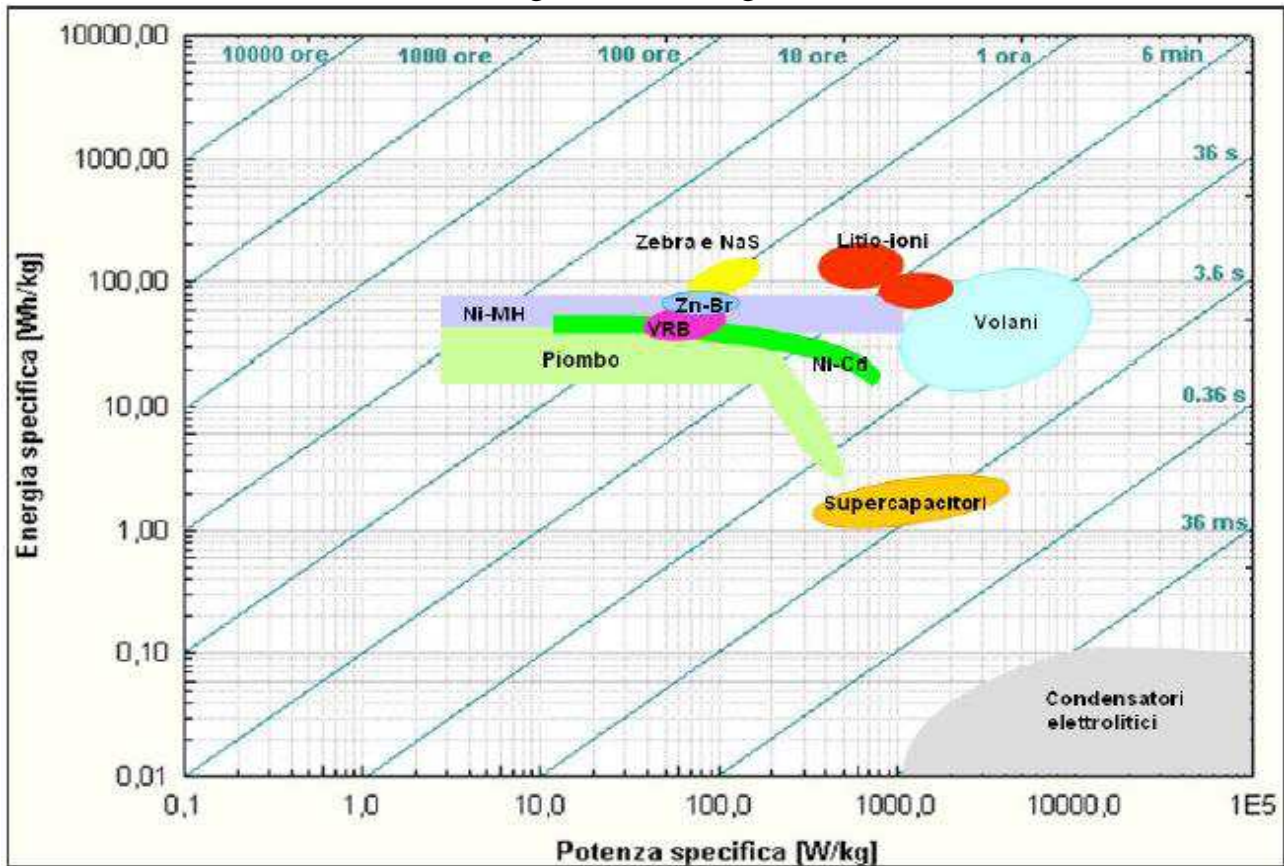


Figura 3.1 - Diagramma di Ragone : ogni area rappresenta i valori di energia specifica e potenza specifica per i vari tipi di sistemi di accumulo

Nell'ottica di effettuare un'analisi completa, tecnologica ed economica, bisogna tuttavia prendere in considerazione altri fattori:

- Costi di monitoraggio e gestione : sono molteplici i dispositivi che permettono di controllare la batteria in tempo reale, soprattutto il suo ciclo di scarica/carica. In questo modo è possibile gestire il sistema in modo più efficace, ad esempio pilotando la fase di carica in modo tale che la batteria si ricarichi solo dell'effettiva energia prelevata nella fase di lavoro. In questo modo si può realizzare un risparmio energetico (i costi della ricarica), un allungamento della vita della batteria e un'analisi completa del dispositivo stesso.

- Costi di interfaccia di conversione : sono tante le configurazioni nella quale un sistema di accumulo può lavorare. Il carico è alimentato direttamente dall'inverter che, ad esempio, per le batterie agli ioni di litio, viene spesso installato e integrato al di sopra del sistema di accumulo che interviene quando è necessario. Nel caso si utilizzi la batteria come gruppo di continuità la corrente alternata di rete passa attraverso un circuito raddrizzatore che la trasforma in corrente continua. Il raddrizzatore può alimentare la batteria alla quale è posto in serie un inverter che ritrasforma la corrente continua in alternata ai valori nominali di rete e/o del carico. Qualora, quindi, si verifici sulla rete di alimentazione l'interruzione della tensione, la mancanza di una fase o una tensione fuori tolleranza, la batteria può provvedere a fornire l'energia necessaria all'inverter per alimentare il carico e a garantire la continuità di esercizio. Una volta ripristinate le normali condizioni di funzionamento, il raddrizzatore carica la batteria e nel contempo alimenta il carico attraverso l'inverter. Il totale controllo dell'inverter inoltre permette di correggere dislivelli di tensione riducendo il numero degli interventi della batteria e anche le differenze nella frequenza di alimentazione.

- Efficienza del sistema di accumulo : esiste un costo relativo all'energia persa a causa dell'inefficienza del sistema di accumulo nella conversione di energia elettrica. Il rendimento dei sistemi di accumulo è alto: 75% per quelle al piombo, 70% per quelle al Nichel, per quelle basate sugli ioni di litio si va dall' 85% al 90%, supercondensatori e volani arrivano al 95%. Bisogna evidenziare che l'efficienza di una batteria progettata per soddisfare le esigenze di una applicazione dipende molto dalla potenza che deve mettere a disposizione per il ciclo. Bisogna valutare quindi qual è l'efficienza ottimale della batteria che garantisce la copertura di tutto l'arco vitale dell'applicazione garantendo i requisiti per effettuare i cicli. A tal proposito è molto importante monitorare la temperatura durante l'esercizio che per la maggior parte dei sistemi deve essere compresa tra i 15° fino ai 25°C. Col ridursi della temperatura, la quantità di corrente che la batteria può erogare nel lasso di tempo di

riferimento, la sua capacità, diminuisce mentre con l'aumentare della temperatura si velocizzano le reazioni chimiche e si verifica una maggiore auto scarica, si ha quindi un deterioramento più marcato e una progressiva riduzione della carica erogabile.

- Costi di manutenzione: costo riguardante le operazioni che servono affinché il sistema di accumulo operi nelle corrette condizioni e in modo sicuro. In fase di manutenzione dell'impianto é fondamentale eseguire un controllo periodico dell'elettrolita. Un tempo le batterie al piombo (definite a vaso aperto) avevano i tappi e attraverso i fori si poteva controllare il livello dell'elettrolita con uno strumento (il densimetro) per verificare se la densità era corretta e con essa lo stato di carica e la salute di ogni cella. Oggi le batterie sono sigillate ed alcune hanno il densimetro integrato richiedendo solo un minimo di manutenzione per essere mantenute in perfetto stato per molto tempo. Le cose da fare in generale sono controllare il livello dell'elettrolita e la sua densità, pulire il coperchio e il contenitore, controllare i morsetti e ingrassarli in alcuni casi, controllare eventuali scarichi se presenti.

- Costi di sostituzione: costi che tengono in considerazione eventuali sostituzioni del sistema di accumulo prima del termine della vita globale dell'impianto

Tutti gli aspetti menzionati devono essere presi in considerazione se si vuole valutare il costo reale del sistema di accumulo. Per condizioni fissate di tensione, corrente e frequenza, i costi relativi all'interfaccia di conversione possono essere considerati costanti (nel caso opposto il costo dipende dalla tecnologia in uso). I costi dovuti ai rimpiazzanti della batteria devono essere attualizzati usando la formula di attualizzazione dei costi NPV (net present value). Il valore attuale netto è una metodologia tramite cui si definisce il valore attuale (in italiano VAN ) di una serie



attesa di flussi di cassa non solo sommandoli contabilmente ma attualizzandoli sulla base del tasso di rendimento.

$$C_{NPV} = \sum_{k=0}^{nr} C_k \frac{(1 + c_r)^{k \cdot n_{year}}}{(1 + d_r)^{k \cdot n_{year}}}$$

Equazione 1: Formula di attualizzazione dei costi-NPV

Dove:

- $nr$  : numero delle sostituzioni necessarie
- $C_k$  : flusso finanziario (positivo o negativo) al tempo  $k$
- $cr$  : costo medio ponderato del capitale (WACC=Weighted Average Cost of Capital), media ponderata tra il costo del capitale proprio e il costo del capitale in debito
- $dr$  : tasso di interesse
- $nyear$  : vita del sistema di accumulo in anni

## Capitolo 4

### Metodologia per la valutazione dei costi

Per la valutazione dei costi e delle caratteristiche che la batteria deve avere, seguiremo un preciso metodo appoggiandoci all'uso di curve caratteristiche che legano tra loro tali grandezze e che sono state riportate nell'articolo [1] delle fonti bibliografiche. Queste curve sono state trovate in modo sperimentale e trattano le grandezze in p.u., perciò per ognuna di esse si è utilizzato come base la rispettive grandezze di catalogo.

Il primo passo per la scelta del tipo di tecnologia del sistema di accumulo che soddisfa i nostri requisiti, incomincia dalla definizione delle prestazioni richieste dalla nostra applicazione in termini di potenza ed energia. Data, quindi, la potenza richiesta dal ciclo, questa viene divisa per la potenza specifica presente sui dati di catalogo del sistema di accumulo che abbiamo scelto. Trovato così la massa, si usa la potenza specifica per trovare l'energia specifica. Si può notare che, siccome le prestazioni di energia di un sistema di accumulo dipendono essenzialmente dalla resistenza interna equivalente, tutti i dispositivi hanno un andamento comune che relaziona la propria potenza specifica con l'energia utilizzata. Di conseguenza, esprimendo le grandezza in p.u., è possibile ottenere una curva capace di rappresentare il legame tra potenza specifica ed energia specifica per tutti i tipi di tecnologia dei sistemi di accumulo. Questo legame è rappresentato dalla curva 1 descritta dalla seguente funzione:

$$W_{spec} = e * \exp(f * P_{spec}) + g$$

Dove e,f,g sono coefficienti ottenuti dall'interpolazione dei dati di catalogo forniti dai costruttori, in particolare:

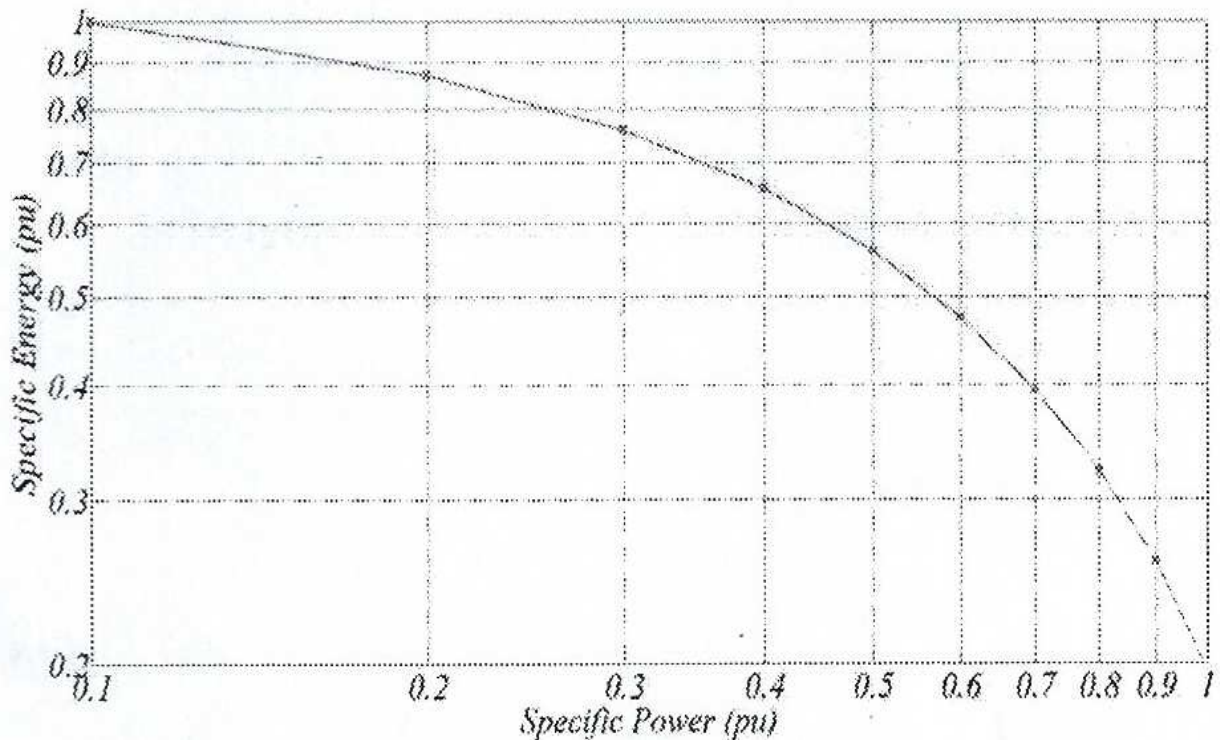
$$e = 1,583$$

$$f = -0,8926$$

$$g = -0,452$$

La massa moltiplicata per l'energia specifica mi fornisce l'energia del sistema di accumulo che deve essere maggiore di quella richiesta dal ciclo. Si provvederà ad aumentare la massa fino al verificarsi della suddetta condizione che determinerà quindi la massa minima e l'energia minima richiesta dal sistema di accumulo.

Potenza specifica vs Energia specifica

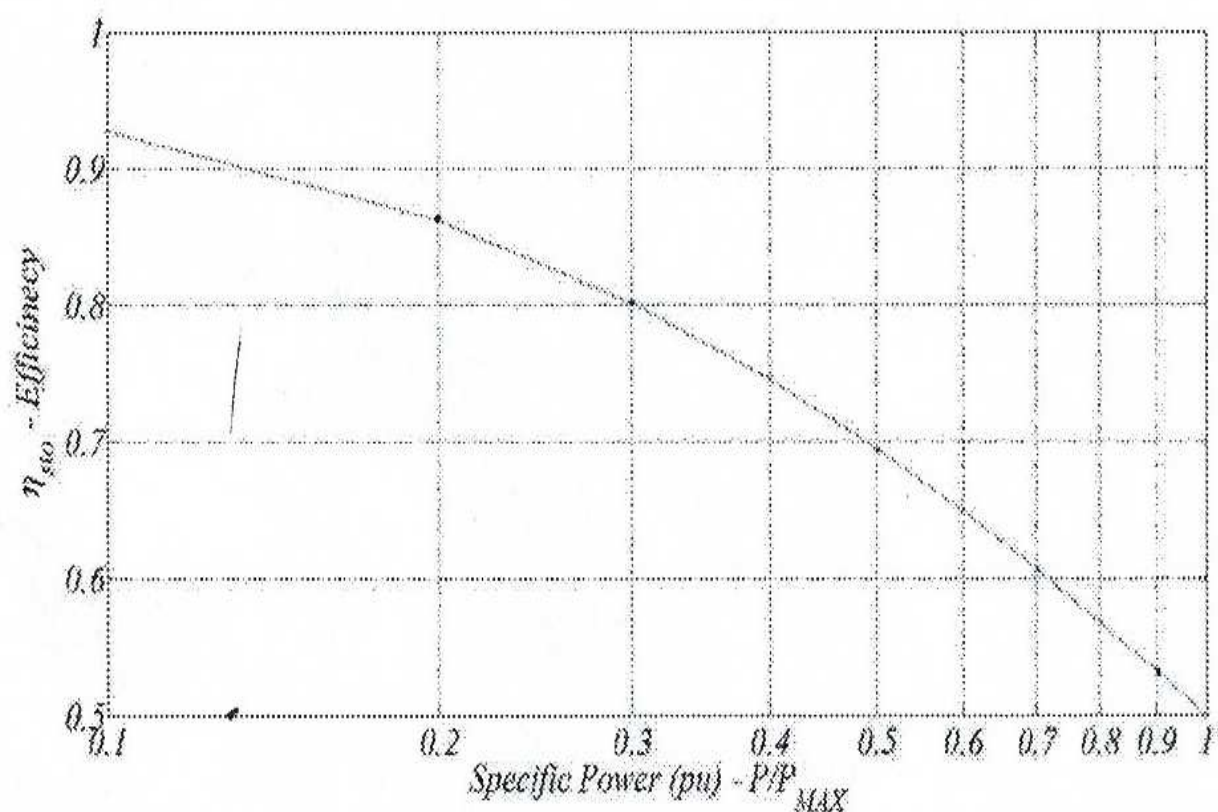


Curva 1 - Curva valida per tutte le tipologie di sistemi di accumulo che lega la potenza specifica e l'energia specifica entrambi in p.u. usando come base rispettivamente la potenza e l'energia specifica massima. Curva riportata in scala semilogaritmica.

Determinati i requisiti minimi si apre una seconda fase dove per ogni incremento della massa si potranno trovare le caratteristiche specifiche del sistema di accumulo e l'ammontare del costo.

La potenza del ciclo viene divisa per la massa incrementata per trovare la potenza specifica. Cambiando la potenza specifica cambia anche l'efficienza del sistema di accumulo e il suo valore si può trovare facendo uso della curva 2. Tipicamente la potenza massima riportata sul catalogo rappresenta la potenza ottenibile ai terminali con una resistenza di carico uguale a quella interna; in queste condizioni si ha un'efficienza pari allo 0,5. Alle basse potenze, l'efficienza del sistema tende al valore nominale riportato sul catalogo. Tramite queste assunzioni si può ottenere un tipico andamento dell'efficienza in funzione della potenza specifica in p.u. per un sistema di accumulo caratterizzato da un'efficienza nominale dello 0,95 :

Efficienza vs Potenza specifica



Curva 2 - Curva che descrive l'efficienza in funzione della potenza specifica in p.u. per un sistema di accumulo caratterizzato da un'efficienza dello 0,95

Trovata l'efficienza della batteria possiamo determinare anche la sua energia specifica sempre usufruendo della potenza specifica e della curva 1 descritta prima.

Moltiplicando l'energia specifica ottenuta con la massa si ricava l'energia immagazzinata che il sistema di accumulo deve fornire. Il quoziente della divisione tra l'energia richiesta dal ciclo con quella del sistema di accumulo fornisce la profondità di scarica, il DoD (Depth of Discharge). Noti tutti questi dati, bisogna cercare di calcolare il costo di capitale attuale del sistema di accumulo in oggetto compreso quello delle unità che mi servono per sostituire la prima batteria installata e coprire così tutto l'arco vitale dell'impianto. Il numero delle sostituzioni può essere ricavato una volta nota la durata vitale del sistema di accumulo in anni che sul catalogo viene riportata raramente. Sui datasheet infatti si trovano spesso i numeri dei cicli di vita cioè il numero dei cicli di scarica e carica totali che la batteria può sostenere in determinate condizioni di esercizio e al DoD specificato, dati che per noi non possono essere presi se non come riferimenti. Per la maggior parte dei casi i cicli di vita riportati sul catalogo vengono riferiti a una condizione in cui il sistema di accumulo viene sfruttato per l'80% del DoD. Tuttavia la relazione tra i numeri di cicli di vita e il DoD può essere espressa tramite la seguente funzione (curva 3) ricavata come interpolazione dei dati riportati negli articoli tecnici delle fonti bibliografiche [7], [8].

$$N_{\text{cicli di vita}} = a \cdot \exp(b \cdot \text{DoD}\%) + c \cdot \exp(d \cdot \text{DoD}\%)$$

Dove a,b,c,d sono coefficienti ottenuti dall'interpolazione dei dati dei cataloghi forniti dai costruttori:

$$a = 24,08$$

$$b = -0,04697$$

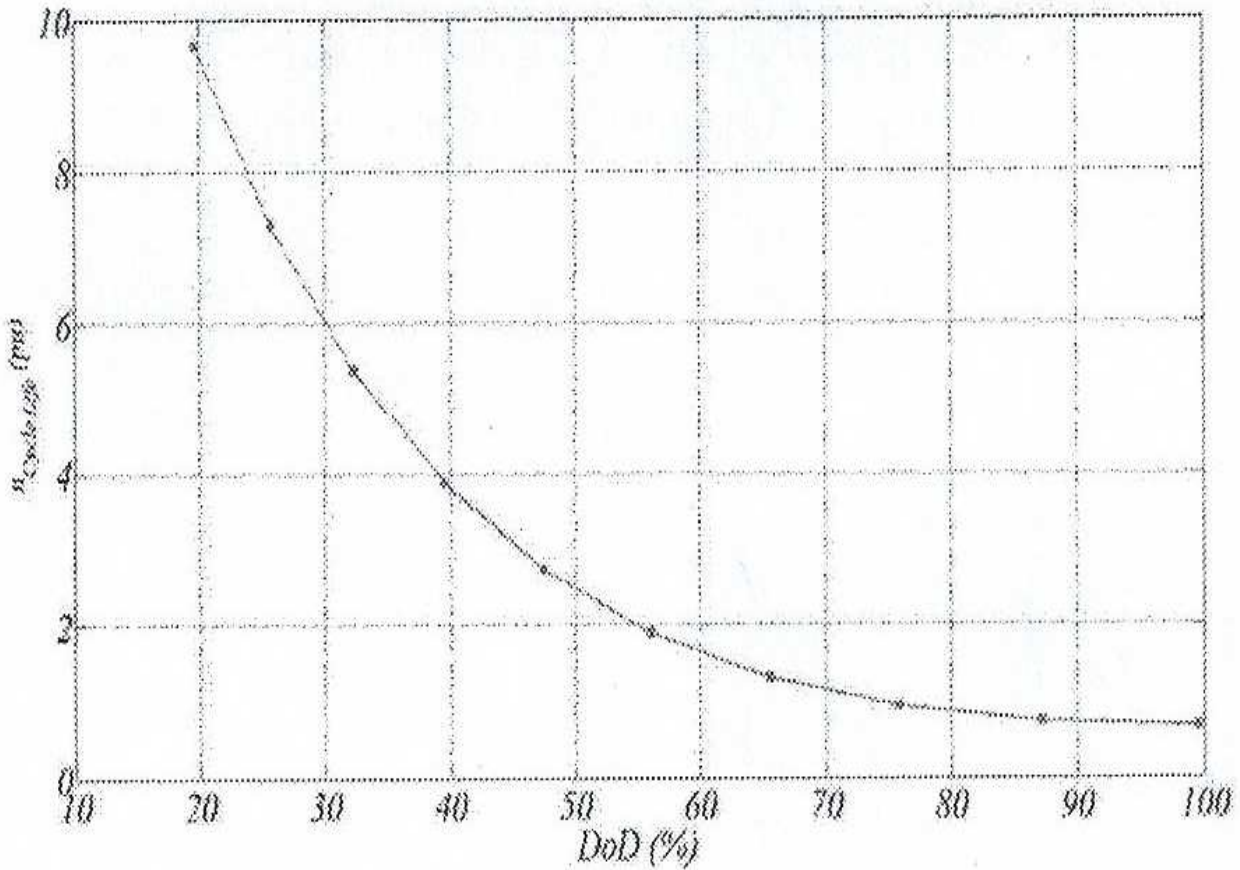
$$c = 0,05155$$

$$d = 0,02717$$

Gli anni di vita del sistema di accumulo si possono determinare in modo approssimativo facendo una proporzione tra i cicli di vita del dispositivo, il numero

totale dei cicli che bisogna sostenere durante tutta la vita dell'impianto e la durata vitale in anni dell'impianto stesso.

Numero dei cicli di vita vs DoD



Curva 3 - Relazione tra i numeri dei cicli di vita in p.u. e il DoD%

Il numero delle sostituzioni necessarie durante la vita dell'impianto, gli anni di vita del dispositivo, l'energia che questo mette a disposizione, il coefficiente di manutenzione e il costo per unità di energia presenti sul catalogo servono per calcolare il costo del capitale del sistema di accumulo che deve essere attualizzato utilizzando l'equazione 1 vista nel capitolo precedente.

Per determinare i costi che si andrebbero ad affrontare se l'investimento venisse fatto oggi vengono usati i tassi del costo del capitale "cr" e il tasso di interesse "dr" relativi all'impianto nella formula seguente di attualizzazione :

$$C_{sto} = \sum_{k=0}^{n_r} C_{sto-sp-w} \cdot W_n \cdot K_M \frac{(1+c_r)^{k \cdot n_{year}}}{(1+d_r)^{k \cdot n_{year}}}$$

Equazione 2 - Formula per il calcolo del costo di capitale del sistema di accumulo

In cui:

- $n_r$  : numero delle sostituzioni necessarie
- $C_{sto-sp-w}$  : costo per unità di energia del sistema di accumulo
- $W_n$  : energia richiesta dal sistema di accumulo calcolato moltiplicando la massa per l'energia specifica di catalogo
- $K_M$  : coefficiente di manutenzione
- $n_{year}$  : vita del sistema di accumulo in anni

Oltre al costo di capitale si dovrà tenere conto anche del costo di esercizio del sistema di accumulo calcolato come il costo dell'energia persa per inefficienza del sistema di accumulo attraverso l'equazione 3. Anche questo costo deve essere attualizzato nel modo già descritto e, sommato al costo del capitale, determina il costo totale.

$$\sum_{k=0}^{L_{plant}} C_{en-sp} \cdot W_{cycle} \cdot (1 - \eta_{sto}) \cdot \frac{n_{cycle} (1 + c_r)^k}{L_{plant} (1 + d_r)^k}$$

Equazione 3 - Formula per il calcolo del costo di esercizio del sistema di accumulo

In cui:

- $C_{en-sp}$  : costo unitario dell'energia
- $W_{cycle}$  : energia richiesta dal ciclo
- $n_{cycle}$  : numero dei cicli compiuti durante la vita dell'impianto
- $\eta_{sto}$  : efficienza del sistema di accumulo
- $L_{plant}$  : vita dell'impianto in anni
- $C_{sto}$  : costo totale del sistema di accumulo

Il costo totale è la somma del costo di capitale del sistema di accumulo determinato dall'equazione 2 e il costo di esercizio determinato dall'equazione 3.

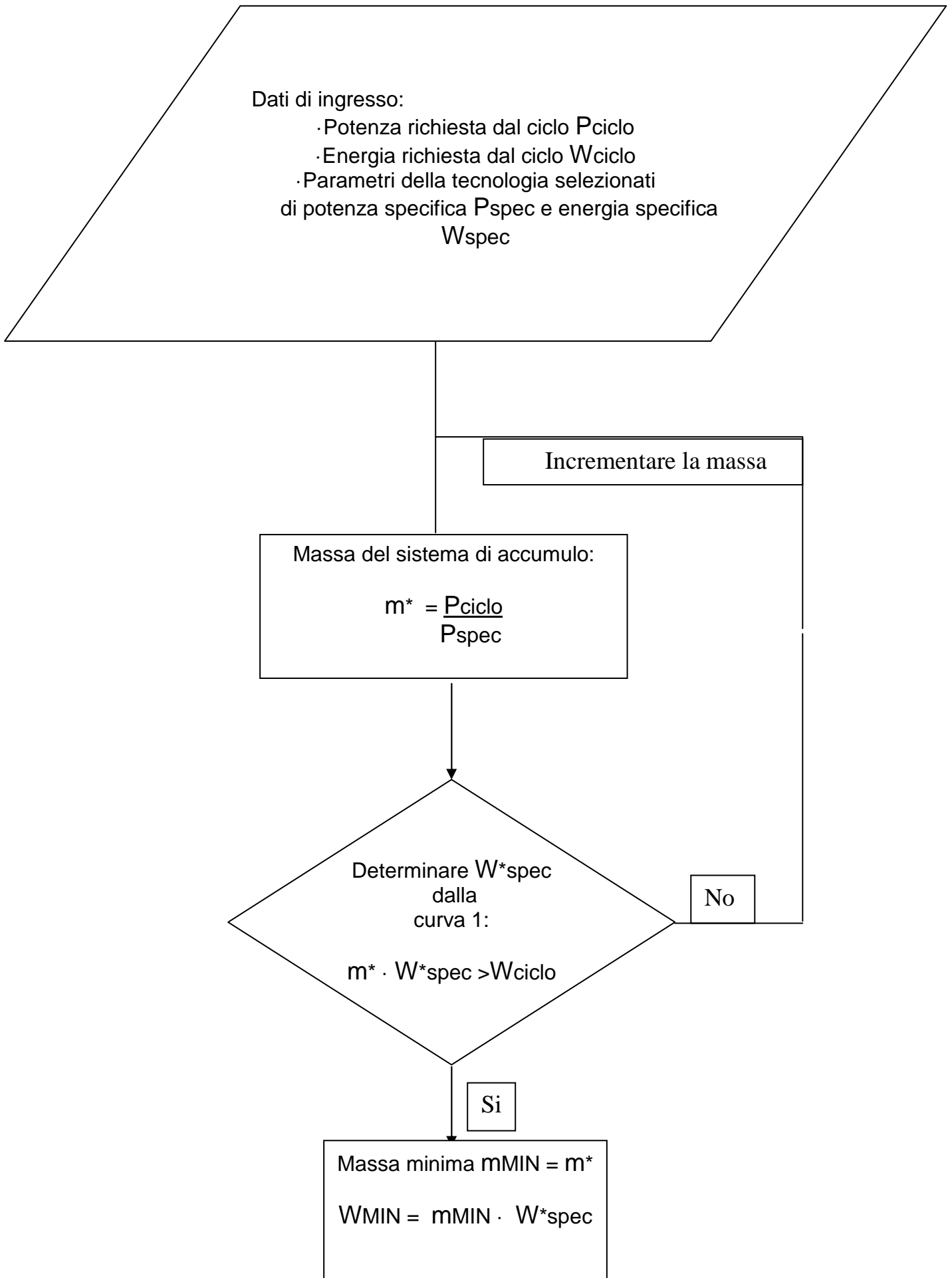
Valutato il costo totale, possiamo determinare quello specifico per ogni ciclo:

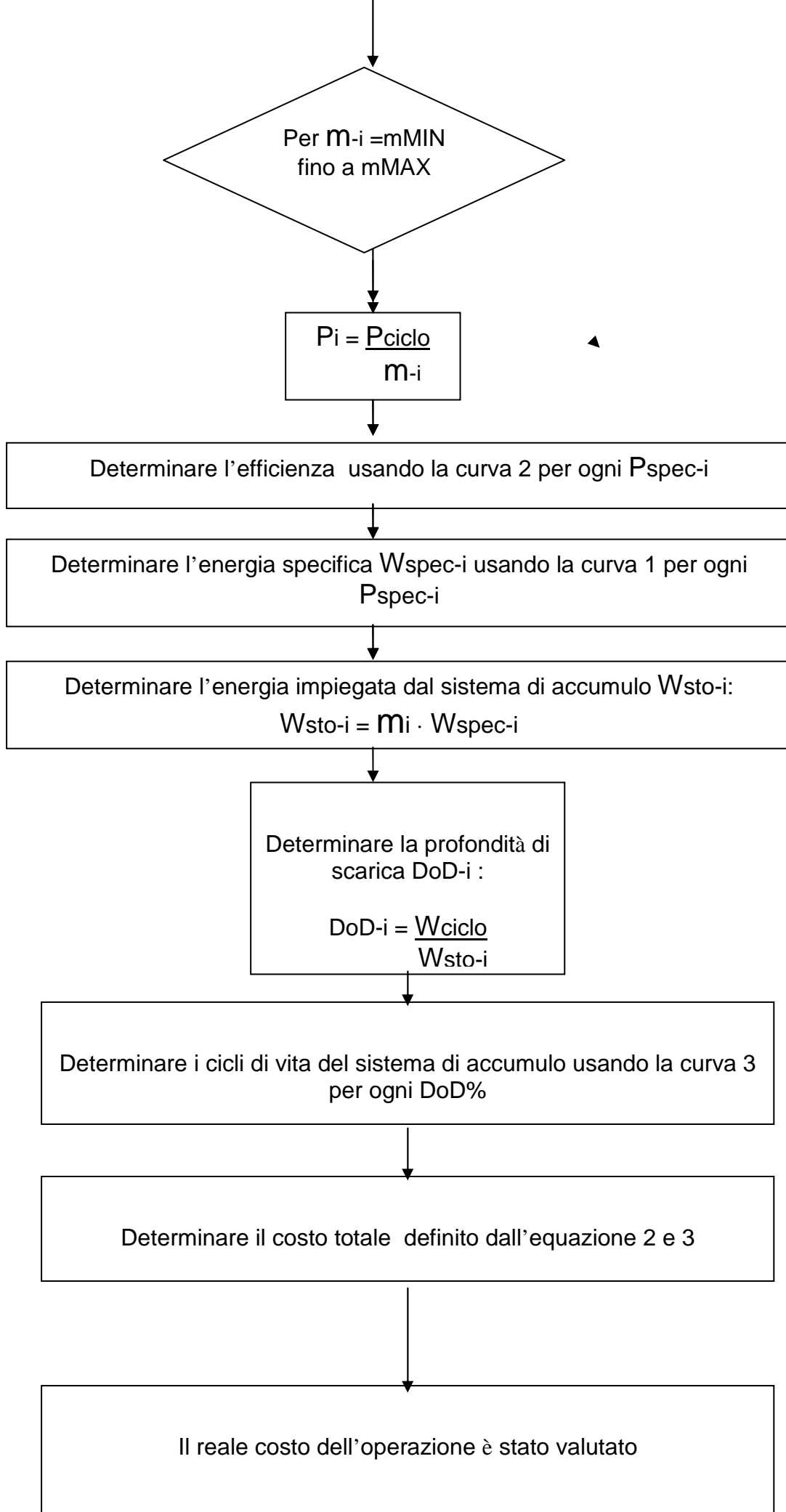


$$C_{sto-sp} = \frac{C_{sto}}{W_{cycle} \cdot n_{cycle}}$$

Equazione 4 - Formula per il calcolo del costo specifico per ogni ciclo

Esposta tutta la procedura, possiamo riepilgarla nel seguente schema:





Prima di applicare tutto quello che si è esposto fino ad ora, bisogna fare alcune osservazioni sul numero delle sostituzioni indispensabili. Quando vogliamo utilizzare dei sistemi di accumulo in modo tale da poter coprire tutta la durata vitale di un impianto, dobbiamo decidere quante batterie sono necessarie (qualora una non bastasse) e quanto ciascuna deve durare. Il numero delle sostituzioni necessarie dipende ovviamente dalla durata vitale della batteria che è difficile da determinare realisticamente. I sistemi di accumulo, infatti, risentono di una perdita progressiva della capacità sia quando questa viene utilizzata sia quando questa viene conservata in scaffale (calendar life). Nella realtà, quindi, un sistema di accumulo ha una durata vitale che è limitata e perciò, nel caso in cui la durata dell'impianto sia molto elevata (superiore come minimo ai 10 anni), non possiamo pensare di installare una sola batteria. Teoricamente, però, la durata vitale della batteria aumenta anche con l'aumentare della massa (incrementa l'energia utilizzata, per cui diminuisce il DoD e aumenta il numero di cicli di vita). Si può concludere, infine, che la scelta di adoperare un solo sistema di accumulo per tutta la durata dell'impianto è teoricamente accettabile ma impossibile nella pratica e, quindi, da scartare in partenza.

## Capitolo 5

### Casi di studio e illustrazione dei risultati

In questo capitolo sarà esposta l'applicazione scelta per essere analizzata dal metodo di valutazione economica del sistema di accumulo mostrato in precedenza. I parametri che definiscono l'applicazione sono stati in seguito modificati designando così differenti casi studio.

#### Applicazione

Il caso di studio esaminato concerne l'installazione di un sistema di accumulo su un impianto navale in grado di fornire la dovuta potenza ed energia per far fronte all'azionamento di eliche direzionali, i thruster, che servono ad agevolare le manovre in fase di uscita o d'ingresso dal porto. Per la manovra in porto o generalmente in acque ristrette, infatti, le navi adottano un sistema dotato di eliche che producono una spinta trasversale solitamente installate nella zona di poppa e di prua della nave. Tale sistema è normalmente conosciuto come "bow-thruster" o "sternthruster", e non deve essere confuso o accomunato con il sistema di propulsione principale. L'elica può ruotare in senso orario o antiorario in un piano parallelo all'asse longitudinale della nave, generando una spinta trasversale verso destra o sinistra.

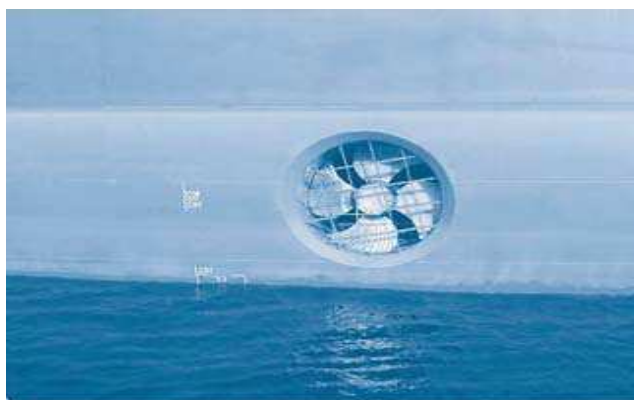


Figura 5.1 - Thruster inserito nello scafo

Un sistema di propulsione rivoluzionario ed innovativo che permette di fare fronte alle più spinte esigenze di bordo e di miglioramento della manovrabilità è il sistema Azipod messo a punto nei primi anni '90. È costituito, come rappresentato in figura 5.2, da un involucro a forma di capsula orientabile “podded”, che è posizionato nella parte sommersa dello scafo, a prua o a poppa in base alla tipologia di nave, (a prua ad esempio per navi rompighiaccio).



Figura 5.2 - Azipod

## Caso studio 1

Le esigenze del ciclo sono una potenza di 1,28 MW e un'energia di 2,906 kWh. Si prevede poi che si debba eseguire il ciclo 2 volte al giorno (un ingresso e un'uscita della nave dal porto). L'impianto ha una durata vitale di 20 anni. Per determinare i costi vengono usati un tasso del costo del capitale "cr" pari a 0,05 e un tasso di interesse "dr" di 0,07.

Consci dei parametri che definiscono il ciclo energetico e i requisiti dell'impianto, è opportuno scegliere attentamente i tipi di sistemi di accumulo che possono essere impiegati. Riprendendo ciò che è stato detto nel capitolo 1, si deve osservare che le batterie al piombo acido sono le meno costose ma hanno bassa potenza ed energia specifica, un basso numero di cicli di vita (sui 1000 all'80% del DoD) e una bassa efficienza (0,75). Queste batterie, inoltre, hanno il problema della solfatazione e un elevato fattore di auto-scarica che richiedono una particolare manutenzione e monitoraggio. La batteria al nichel, invece, ha un maggiore numero di cicli (2000) e una maggiore potenza specifica, ma una minore efficienza (0,7). Agli aspetti negativi della batteria al nichel si aggiunge l'effetto memoria e un notevole fattore di auto-scarica. I sistemi di accumulo agli ioni di litio hanno un costo maggiore, tuttavia hanno delle caratteristiche che la rendono molto più adatta alla nostra applicazione. Queste batterie, infatti, hanno un elevato numero di cicli di vita (2500-5000), alte potenze specifiche, nessun effetto memoria e un basso, ma comunque presente, valore di auto-scarica. Se si tiene in considerazione che il nostro impianto ha una durata vitale di 20 anni nei quali deve fare al minimo 14600 cicli (2 al giorno per 20 anni) che richiedono molta più potenza che energia (1,28 MW contro 2,906 kWh), si comprende immediatamente come le batterie agli ioni di litio siano le più indicate per la nostra applicazione. Queste batterie, infine, hanno un'elevata efficienza (0,85-0,9), inferiore solamente ai supercondensatori (0,95). I supercondensatori hanno lo svantaggio di essere di gran lunga le più costose ma, oltre ad avere la più alta efficienza, possono sostenere un elevatissimo numero di cicli di vita (dai 300000 ai 1000000) e hanno una durata vitale che è in media con tutte le altre (10 anni). Il loro

punto debole è quella di avere una vita in scaffale molto bassa (sui 2 anni) quindi non sono adatte per applicazioni di lunga durata che richiedono un eventuale cambio della batteria. Questa tipologia di sistema di accumulo è quella più soggetta ad attività di studio e ricerca in quanto si prevedono buoni margini di miglioramento sia tecnologico, ad esempio mediante l'utilizzo di materiali innovativi per gli elettrodi (ad esempio materiali nano strutturati) e per gli elettroliti, sia economico. Per questi motivi i supercondensatori sono stati presi in considerazione insieme alle batterie agli ioni di litio. Per il nostro sistema di dimensionamento e valutazione economica, si sono presi in considerazione una batteria agli ioni di litio titanite (LTO) chiamata per semplicità di tipo A, una agli ioni di litio manganese ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ -LMO) di tipo B, una agli ioni di litio ferro-fosfato ( $\text{LiFePO}_4$  o LFP) di tipo C, un tipico supercondensatore e un supercondensatore ibrido. I parametri utilizzati per questi sistemi di accumulo sono quelli riportati nell'articolo [1], presente nelle fonti bibliografiche, in cui vengono mostrate le caratteristiche delle batterie più comunemente utilizzate per il tipo di applicazioni navali .



## BATTERIA AGLI IONI DI LITIO LTO - TIPO A

Seguendo le procedure del diagramma di flusso e usando i dati relativi alla nostra applicazione si può calcolare la massa minima richiesta che il sistema di accumulo deve avere :

### Dati utilizzati :

### Calcolo dei parametri minimi del sistema di accumulo

Massa minima richiesta [Kg]

Potenza richiesta dal ciclo [W]	1280000
Energia richiesta dal ciclo [Wh]	2906
Potenza specifica del sistema di accumulo scelto[w/kg]	2700
Energia specifica del sistema di accumulo scelto[wh/kg]	47
Potenza massima specifica del sistema di accumulo [W/kg]	2700
Energia massima specifica del sistema di accumulo [Wh/kg]	47
Numero di cicli del sistema di accumulo dal datasheet	5000
Massa minima richiesta	474,0741
(Massa iniziale [Kg])	474,0741
Energia minima richiesta del sistema di accumulo [Wh]	4375,639
Coefficiente di manutenzione del sistema di accumulo	1,3
Efficienza nominale	0,9

La massa minima richiesta è di 474 Kg. Utilizzando i parametri relativi all'impianto e al sistema di accumulo è possibile calcolare l'andamento dei costi ad ogni incremento della massa. Il numero dell'iterazione tot. corrisponde all'aumento della massa minima richiesta di tot. chili.:

## Calcolo dei costi

Calcolo dei costi ad ogni iterazione

Costo del sistema di accumulo al Wh		0,28
Coefficiente di manutenzione del sistema di accumulo		1,3
Costo dell'energia [€/Wh]		0,0002
Durata vitale dell'impianto in anni [Lp]		20
Tasso del costo del capitale (cr)		0,05
Tasso di interesse (dr)		0,07
Numero dei cicli previsti durante la vita dell'impianto (nc)		14600
Massa minima del sistema di accumulo		474

### Numero di cicli effettuati - ad ogni iterazione aumenta la massa di 1 Kg

N° ITERAZIONE	0	1	2	3
COSTO DEL CAPITALE [Euro]	20725,89098	20769,61648	20813,34	20857,07
COSTO DI ESERCIZIO [Euro]	3593,380931	3587,949436	3582,567	3577,233
POTENZA SPECIFICA DISPONIBILE [W/Kg]	2700,421941	2694,736842	2689,076	2683,438
ENERGIA SPECIFICA DISPONIBILE [Wh/Kg]	9,225613005	9,282933015	9,340119	9,397172
EFFICIENZA	0,496377782	0,497139021	0,497893	0,498641
DoD-DEPTH OF DISCHARGE %	66,45413898	65,90476013	65,36364	64,8306
NUMERO DI SOSTITUZIONI	2	2	2	2
DURATA VITALE IN ANNI	9	9	9	9
NUMERO DI CICLI DI VITA	6877	6992	7110	7230
MASSA [Kg]	474	475	476	477
COSTO TOTALE [Euro]	24319,27191	24357,56592	24395,91	24434,3
COSTO TOTALE PER CICLO [Euro/Wh]	0,000573195	0,000574097	0,000575	0,000576

4	5	6	7	8	9	10	11	12
14949,08	14980,36	15011,63	15042,91	15074,18	15105,456	15008,57	15039,58	15070,59
3571,946	3566,705	3561,508	3556,355	3551,244	3546,1752	3541,147	3536,157	3531,207
2677,824	2672,234	2666,667	2661,123	2655,602	2650,1035	2644,628	2639,175	2633,745
9,454092	9,51088	9,567535	9,624058	9,68045	9,7367111	9,792841	9,848841	9,90471
0,499382	0,500117	0,500845	0,501567	0,502283	0,5029938	0,503699	0,504398	0,505092
64,30546	63,78806	63,27823	62,7758	62,28063	61,792561	61,31144	60,83714	60,3695
1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	10	10	10	10	10	11	11	11
7352	7476	7601	7729	7859	7990	8123	8258	8394
478	479	480	481	482	483	484	485	486
18521,03	18547,06	18573,14	18599,26	18625,43	18651,631	18549,72	18575,74	18601,8
0,000437	0,000437	0,000438	0,000438	0,000439	0,0004396	0,000437	0,000438	0,000438

13	14	15	16	17	18	19	20	21
15101,6	15132,61	15036,56	15067,31	15098,06	15128,81	15159,56	15064,34	15094,84
3526,294	3521,417	3516,577	3511,771	3507	3502,262	3497,556	3492,883	3488,24
2628,337	2622,951	2617,587	2612,245	2606,925	2601,626	2596,349	2591,093	2585,859
9,96045	10,01606	10,07154	10,1269	10,18212	10,23722	10,29219	10,34703	10,40174
0,50578	0,506464	0,507142	0,507816	0,508484	0,509148	0,509808	0,510463	0,511114
59,90839	59,45369	59,00526	58,56298	58,12673	57,69638	57,27183	56,85295	56,43964
1	1	1	1	1	1	1	1	1
11	11	12	12	12	12	12	13	13
8533	8672	8814	8956	9101	9246	9394	9542	9692
487	488	489	490	491	492	493	494	495
18627,89	18654,03	18553,13	18579,08	18605,06	18631,07	18657,11	18557,23	18583,08
0,000439	0,00044	0,000437	0,000438	0,000439	0,000439	0,00044	0,000437	0,000438

22	23	24	25	26	27	28	29	30
15125,33	15155,83	15186,32	15091,96	15122,2	15152,45	15182,69	15212,94	15119,43
3483,628	3479,045	3474,491	3469,965	3465,468	3460,997	3456,552	3452,133	3447,74
2580,645	2575,453	2570,281	2565,13	2560	2554,89	2549,801	2544,732	2539,683
10,45633	10,5108	10,56513	10,61935	10,67343	10,7274	10,78123	10,83495	10,88854
0,51176	0,512402	0,513041	0,513675	0,514305	0,514932	0,515555	0,516174	0,51679
56,03179	55,6293	55,23206	54,83998	54,45296	54,0709	53,69372	53,32131	52,9536
1	1	1	1	1	1	1	1	1
13	13	13	14	14	14	14	14	15
9843	9996	10150	10304	10461	10618	10776	10936	11096
496	497	498	499	500	501	502	503	504
18608,96	18634,87	18660,81	18561,92	18587,67	18613,44	18639,24	18665,07	18567,17
0,000439	0,000439	0,00044	0,000437	0,000438	0,000439	0,000439	0,00044	0,000438

31	32	33	34	35	36	37	38	39
15149,43	15179,43	15209,42	15117,02	15146,78	15176,54	15206,29	15114,99	15144,51
3443,371	3439,026	3434,704	3430,406	3426,13	3421,876	3417,644	3413,432	3409,242
2534,653	2529,644	2524,655	2519,685	2514,735	2509,804	2504,892	2500	2495,127
10,942	10,99535	11,04857	11,10167	11,15465	11,2075	11,26024	11,31285	11,36535
0,517402	0,518011	0,518617	0,519219	0,519818	0,520415	0,521008	0,521598	0,522185
52,5905	52,23193	51,8778	51,52803	51,18255	50,84129	50,50415	50,17108	49,84201
1	1	1	1	1	1	1	1	1
15	15	15	16	16	16	16	17	17
11258	11420	11584	11748	11913	12080	12247	12415	12583
505	506	507	508	509	510	511	512	513
18592,8	18618,45	18644,13	18547,43	18572,91	18598,41	18623,94	18528,42	18553,75
0,000438	0,000439	0,000439	0,000437	0,000438	0,000438	0,000439	0,000437	0,000437

40	41	42	43	44	45	46	47	48
15174,03	15203,56	15233,08	15142,64	15171,93	15201,22	15230,51	15141,17	15170,23
3405,071	3400,92	3396,789	3392,676	3388,582	3384,506	3380,448	3376,407	3372,383
2490,272	2485,437	2480,62	2475,822	2471,042	2466,281	2461,538	2456,814	2452,107
11,41772	11,46997	11,52211	11,57412	11,62602	11,6778	11,72946	11,781	11,83243
0,52277	0,523352	0,523931	0,524507	0,525081	0,525652	0,526221	0,526787	0,527351
49,51686	49,19556	48,87805	48,56427	48,25416	47,94764	47,64466	47,34516	47,04909
1	1	1	1	1	1	1	1	1
17	17	17	18	18	18	18	19	19
12753	12923	13094	13266	13438	13611	13785	13959	14134
514	515	516	517	518	519	520	521	522
18579,11	18604,48	18629,87	18535,32	18560,51	18585,73	18610,96	18517,58	18542,62
0,000438	0,000438	0,000439	0,000437	0,000437	0,000438	0,000439	0,000436	0,000437

49	50	51	52	53
15199,29	15228,36	8981,7	8998,808	9015,916
3368,376	3364,385	3360,41	3356,451	3352,507
2447,419	2442,748	2438,095	2433,46	2428,843
11,88374	11,93493	11,986	12,03696	12,0878
0,527913	0,528472	0,529029	0,529584	0,530137
46,75639	46,46699	46,18085	45,89792	45,61814
1	1	0	0	0
19	19	20	20	20
14310	14486	14663	14840	15017
523	524	525	526	527
18567,67	18592,74	12342,11	12355,26	12368,42
0,000438	0,000438	0,000291	0,000291	0,000292

Figura 5.3 - Costi di impianto per una batteria agli ioni di litio LTO - TIPO A - caso studio 1

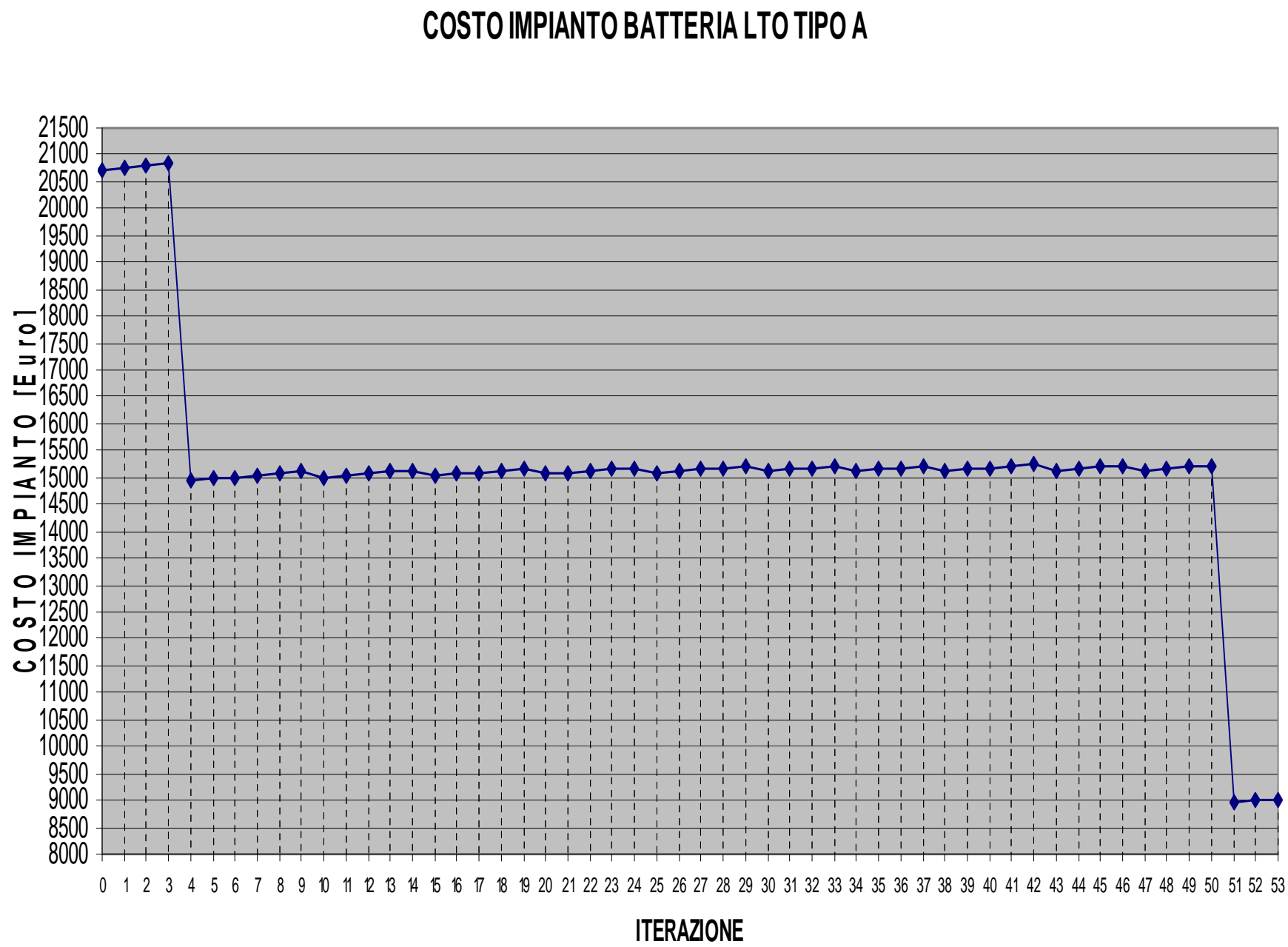


Figura 5.4 - Costi di esercizio per una batteria agli ioni di litio LTO - TIPO A - caso studio 1

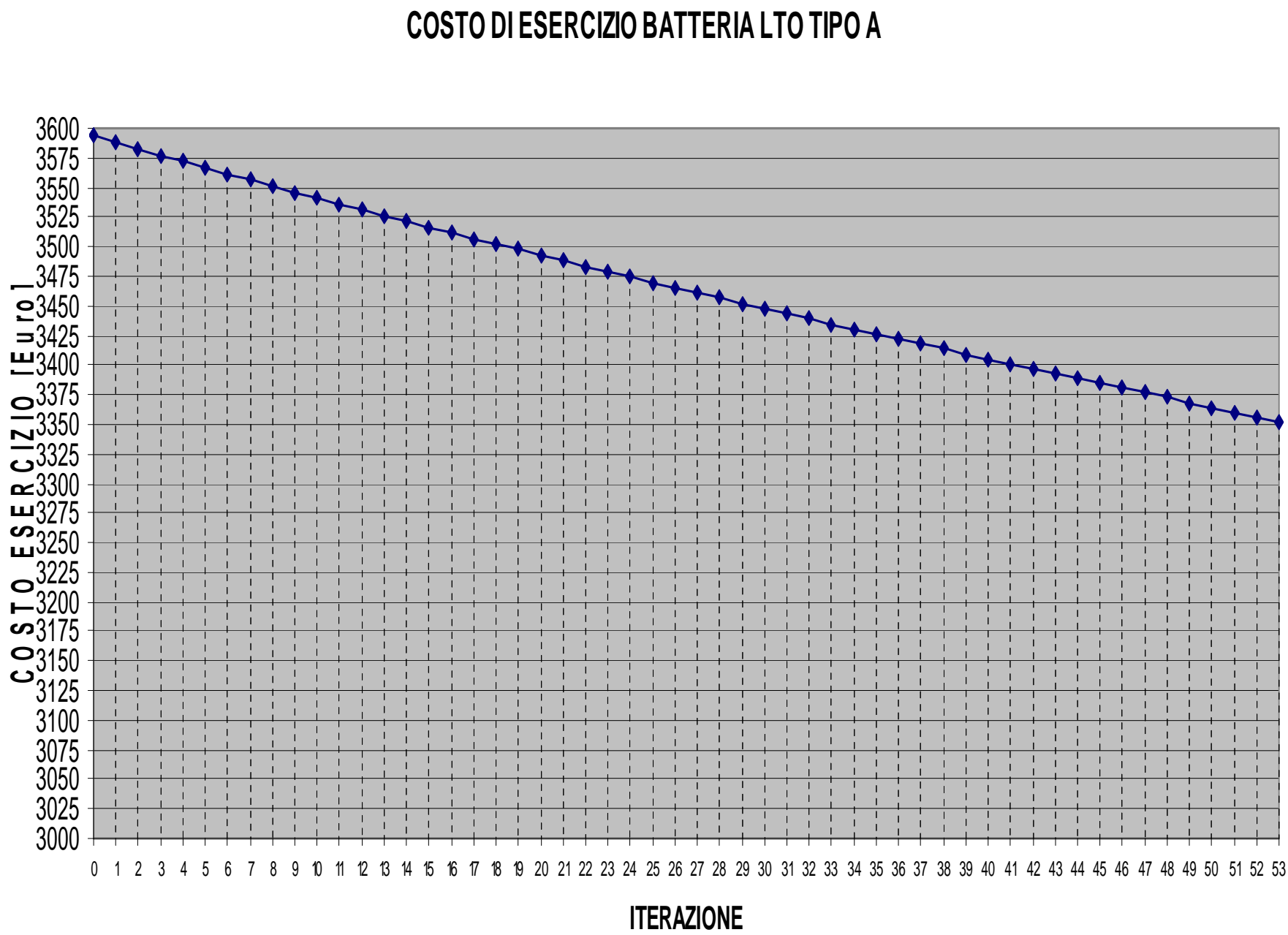


Figura 5.5 - Costi totali per una batteria agli ioni di litio LTO - TIPO A - caso studio 1

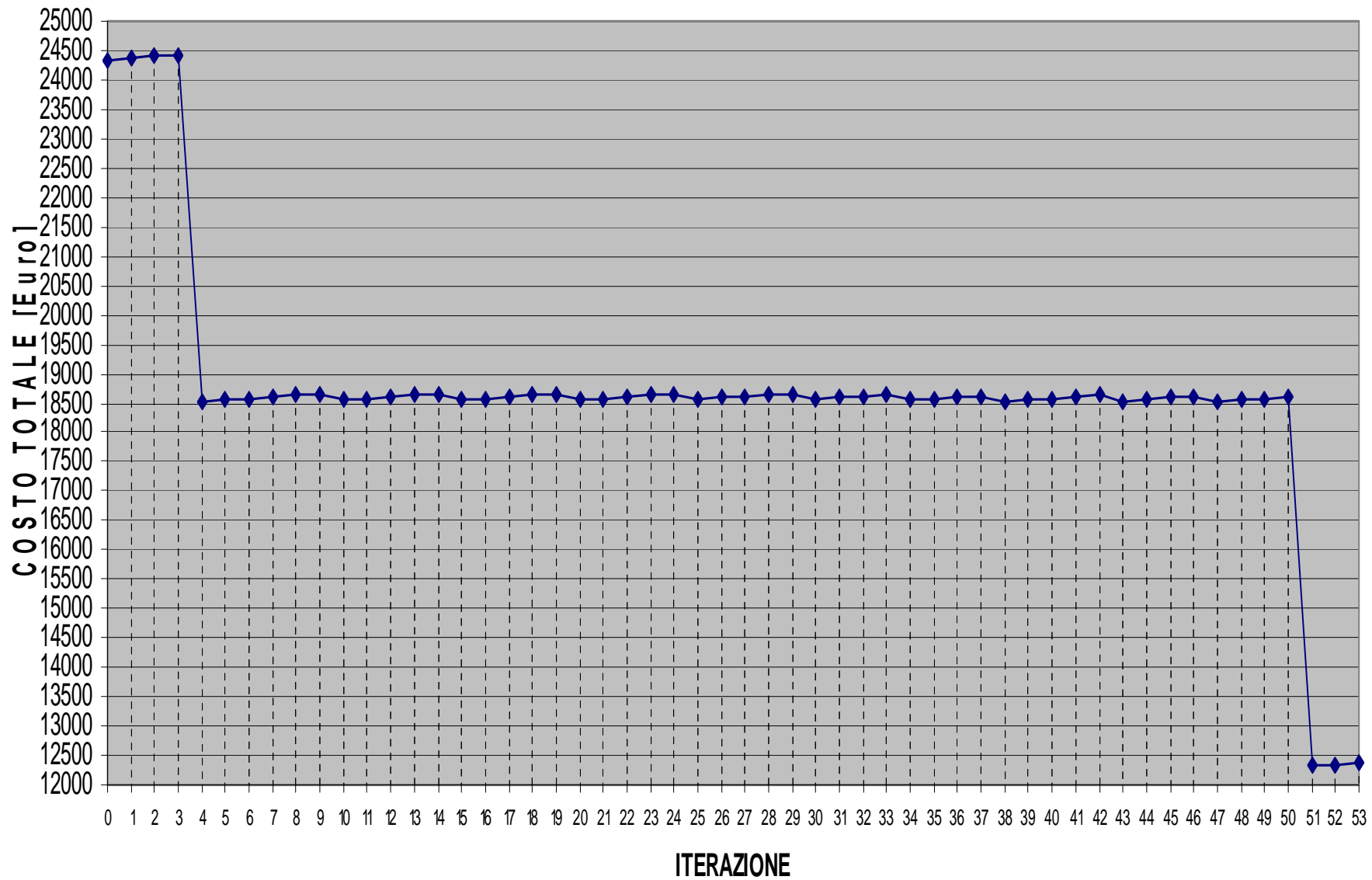
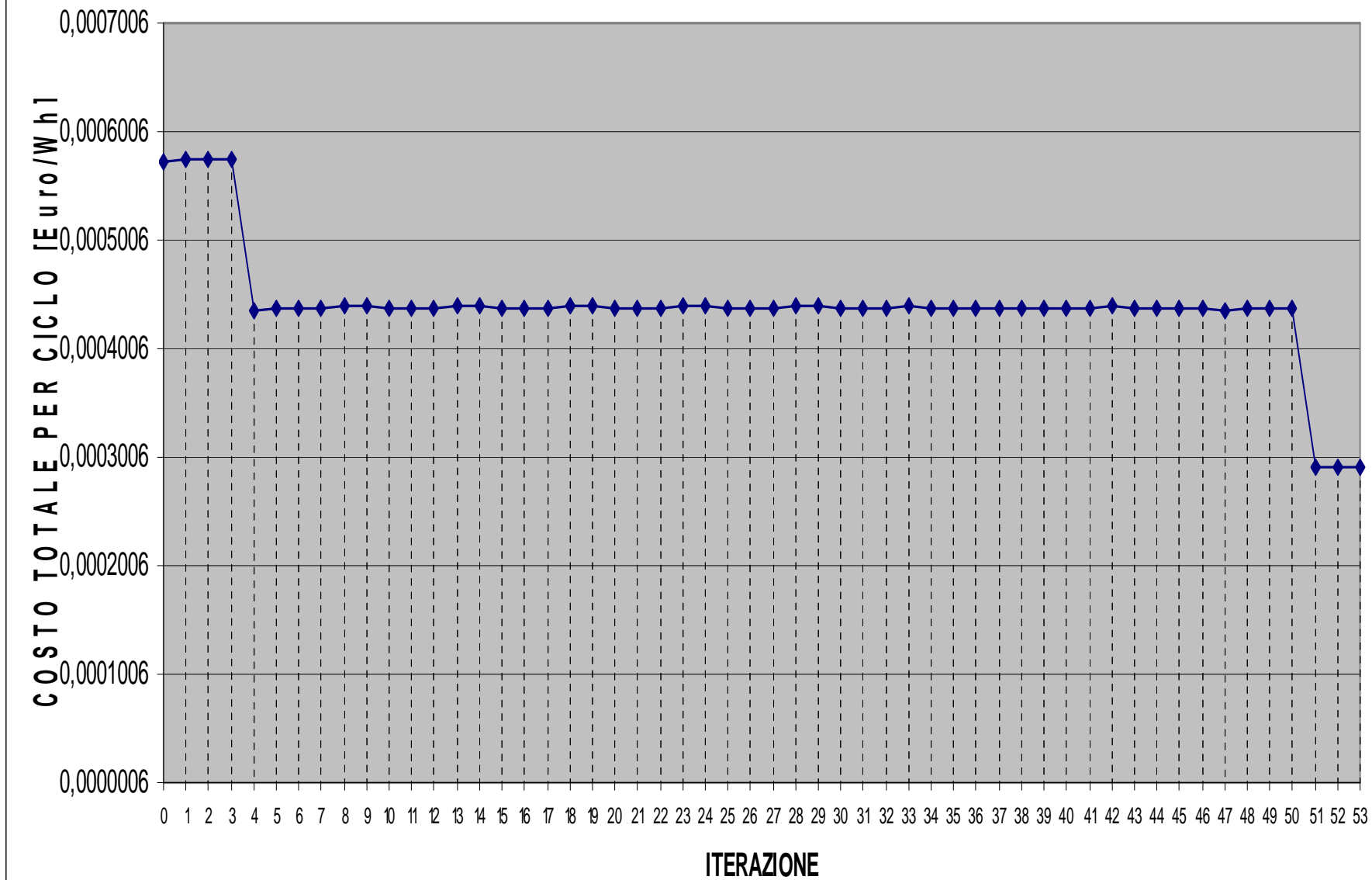


Figura 5.6 - Costi totali per ciclo per una batteria agli ioni di litio LTO - TIPO A - caso studio 1





## Osservazioni :

Dall'iterazione 0 all'iterazione 3 ogni batteria dura 9 anni sono necessarie 2 sostituzioni per coprire tutta la durata vitale dell'impianto di 20 anni. In questo frangente, la soluzione più vantaggiosa è quella rappresentata dall'iterazione 0 dove si utilizza la massa minima richiesta di 474 Kg del sistema di accumulo e il costo totale ammonta a euro 24319 (0,0005732 euro per ciclo). Dalla quarta iterazione in poi bisogna tenere conto che la batteria dovrà essere sostituita una sola volta mentre dalla cinquantunesima iterazione non devo fare nessuna sostituzione. I sistemi di accumulo, però, risentono di una perdita progressiva della capacità sia quando questa viene utilizzata sia quando questa viene conservata in scaffale (calendar life), e, nella realtà, questo fenomeno riduce la durata vitale che, in media, non supera mai i 10 anni. Per questi motivi la scelta di adoperare un solo sistema di accumulo per tutta la durata dell'impianto (20 anni) deve essere scartata. Nel caso delle zero sostituzioni possiamo, tuttavia, fare delle osservazioni sull'andamento dei costi che, nella pratica generale, possono rivelarsi utili qualora la durata vitale dell'impianto sia inferiore o uguale a quella media di un sistema di accumulo. In quest'ultimo caso si può notare, infatti, che elevando la massa, ed essendo sempre uguale il numero delle sostituzioni, il costo proprio del sistema di accumulo aumenta come conseguenza dell'aumento della massa; di pari passo incrementa il costo totale, nonostante ci sia da sommare il costo di esercizio per inefficienza che, però, diminuisce (aumentando la massa diminuisce la potenza specifica mentre l'efficienza aumenta). Da questo punto in poi quindi è solo una questione d'ingombro e di quanto spazio è disponibile per ospitare la batteria.

Ritornando alle osservazioni generali, si può vedere che il DoD passa da un valore iniziale del 66% fino al 45% mentre l'efficienza si aggira tra lo 0,49 e lo 0,53.

Ogni volta che diminuisce il numero delle sostituzioni, ho delle diminuzioni più marcate dei costi totali e d'impianto che sono evidenti se si osservano i grafici.

E' importante osservare che i grafici dei costi d'impianto e, di conseguenza, quelli totali mostrano un andamento non rettilineo dato che in alcuni tratti i valori

diminuiscono mentre in altri aumentano. Questo effetto però è dovuto al modello di valutazione adottato in cui dal valore ricavato degli anni di vita del sistema di accumulo è stata rimossa tutta la parte frazionaria. Si è ritenuto opportuno approssimare sempre per difetto la durata vitale della batteria in quanto il suo utilizzo ne accorcia sempre la durata prevista mentre quella reale è imprevedibile. Se utilizzassi il numero ricavato degli anni, senza nessuna approssimazione, otterrei questi risultati :

N° ITERAZIONE	0	1	2	3
COSTO DEL CAPITALE [Euro]	20580,74001	20569,95254	20558,2	20545,51
COSTO DI ESERCIZIO [Euro]	3593,380931	3587,949436	3582,567	3577,233
POTENZA SPECIFICA DISPONIBILE [W/Kg]	2700,421941	2694,736842	2689,076	2683,438
ENERGIA SPECIFICA DISPONIBILE [Wh/Kg]	9,225613005	9,282933015	9,340119	9,397172
EFFICIENZA	0,496377782	0,497139021	0,497893	0,498641
DoD-DEPTH OF DISCHARGE %	66,45413898	65,90476013	65,36364	64,8306
NUMERO DI SOSTITUZIONI	2	2	2	2
DURATA VITALE IN ANNI	9,421006339	9,579302318	9,740537	9,90464
NUMERO DI CICLI DI VITA	6877	6992	7110	7230
MASSA [Kg]	474	475	476	477
COSTO TOTALE [Euro]	24174,12094	24157,90198	24140,77	24122,74
COSTO TOTALE PER CICLO [Euro/Wh]	0,000569773	0,000569391	0,000569	0,000569

4	5	6	7	8	9	10	11	12
14939,95	14949,55	14958,79	14967,68	14976,22	14984,439	14992,33	14999,91	15007,18
3571,946	3566,705	3561,508	3556,355	3551,244	3546,1752	3541,147	3536,157	3531,207
2677,824	2672,234	2666,667	2661,123	2655,602	2650,1035	2644,628	2639,175	2633,745
9,454092	9,51088	9,567535	9,624058	9,68045	9,7367111	9,792841	9,848841	9,90471
0,499382	0,500117	0,500845	0,501567	0,502283	0,5029938	0,503699	0,504398	0,505092
64,30546	63,78806	63,27823	62,7758	62,28063	61,792561	61,31144	60,83714	60,3695
1	1	1	1	1	1	1	1	1
10,07154	10,24118	10,41348	10,58838	10,76582	10,945746	11,12809	11,31279	11,49979
7352	7476	7601	7729	7859	7990	8123	8258	8394
478	479	480	481	482	483	484	485	486
18511,9	18516,25	18520,3	18524,03	18527,47	18530,615	18533,48	18536,06	18538,38
0,000436	0,000436	0,000437	0,000437	0,000437	0,0004368	0,000437	0,000437	0,000437

13	14	15	16	17	18	19	20	21
15014,15	15020,84	15027,24	15033,37	15039,24	15044,85	15050,22	15055,34	15060,22
3526,294	3521,417	3516,577	3511,771	3507	3502,262	3497,556	3492,883	3488,24
2628,337	2622,951	2617,587	2612,245	2606,925	2601,626	2596,349	2591,093	2585,859
9,96045	10,01606	10,07154	10,1269	10,18212	10,23722	10,29219	10,34703	10,40174
0,50578	0,506464	0,507142	0,507816	0,508484	0,509148	0,509808	0,510463	0,511114
59,90839	59,45369	59,00526	58,56298	58,12673	57,69638	57,27183	56,85295	56,43964
1	1	1	1	1	1	1	1	1
11,68904	11,88049	12,07407	12,26973	12,46743	12,66712	12,86873	13,07223	13,27757
8533	8672	8814	8956	9101	9246	9394	9542	9692
487	488	489	490	491	492	493	494	495
18540,45	18542,25	18543,82	18545,14	18546,24	18547,11	18547,77	18548,22	18548,46
0,000437	0,000437	0,000437	0,000437	0,000437	0,000437	0,000437	0,000437	0,000437

22	23	24	25	26	27	28	29	30
15064,89	15069,33	15073,56	15077,58	15081,41	15085,04	15088,49	15091,76	15094,86
3483,628	3479,045	3474,491	3469,965	3465,468	3460,997	3456,552	3452,133	3447,74
2580,645	2575,453	2570,281	2565,13	2560	2554,89	2549,801	2544,732	2539,683
10,45633	10,5108	10,56513	10,61935	10,67343	10,7274	10,78123	10,83495	10,88854
0,51176	0,512402	0,513041	0,513675	0,514305	0,514932	0,515555	0,516174	0,51679
56,03179	55,6293	55,23206	54,83998	54,45296	54,0709	53,69372	53,32131	52,9536
1	1	1	1	1	1	1	1	1
13,4847	13,69357	13,90414	14,11636	14,33019	14,54559	14,76251	14,98092	15,20078
9843	9996	10150	10304	10461	10618	10776	10936	11096
496	497	498	499	500	501	502	503	504
18548,51	18548,37	18548,05	18547,55	18546,88	18546,04	18545,04	18543,9	18542,6
0,000437	0,000437	0,000437	0,000437	0,000437	0,000437	0,000437	0,000437	0,000437

31	32	33	34	35	36	37	38	39
15097,79	15100,57	15103,18	15105,65	15107,98	15110,17	15112,23	15114,16	15115,97
3443,371	3439,026	3434,704	3430,406	3426,13	3421,876	3417,644	3413,432	3409,242
2534,653	2529,644	2524,655	2519,685	2514,735	2509,804	2504,892	2500	2495,127
10,942	10,99535	11,04857	11,10167	11,15465	11,2075	11,26024	11,31285	11,36535
0,517402	0,518011	0,518617	0,519219	0,519818	0,520415	0,521008	0,521598	0,522185
52,5905	52,23193	51,8778	51,52803	51,18255	50,84129	50,50415	50,17108	49,84201
1	1	1	1	1	1	1	1	1
15,42203	15,64465	15,8686	16,09383	16,32032	16,54802	16,7769	17,00692	17,23806
11258	11420	11584	11748	11913	12080	12247	12415	12583
505	506	507	508	509	510	511	512	513
18541,16	18539,59	18537,89	18536,06	18534,11	18532,05	18529,87	18527,59	18525,21
0,000437	0,000437	0,000437	0,000437	0,000437	0,000437	0,000437	0,000437	0,000437

40	41	42	43	44	45	46	47	48
15117,67	15119,25	15120,74	15122,11	15123,4	15124,59	15125,7	15126,72	15127,67
3405,071	3400,92	3396,789	3392,676	3388,582	3384,506	3380,448	3376,407	3372,383
2490,272	2485,437	2480,62	2475,822	2471,042	2466,281	2461,538	2456,814	2452,107
11,41772	11,46997	11,52211	11,57412	11,62602	11,6778	11,72946	11,781	11,83243
0,52277	0,523352	0,523931	0,524507	0,525081	0,525652	0,526221	0,526787	0,527351
49,51686	49,19556	48,87805	48,56427	48,25416	47,94764	47,64466	47,34516	47,04909
1	1	1	1	1	1	1	1	1
17,47027	17,70352	17,93778	18,17301	18,40919	18,64629	18,88427	19,1231	19,36276
12753	12923	13094	13266	13438	13611	13785	13959	14134
514	515	516	517	518	519	520	521	522
18522,74	18520,18	18517,52	18514,79	18511,98	18509,1	18506,15	18503,13	18500,05
0,000437	0,000437	0,000436	0,000436	0,000436	0,000436	0,000436	0,000436	0,000436

49	50	51	52	53
15128,54	15129,35	8981,7	8998,808	9015,916
3368,376	3364,385	3360,41	3356,451	3352,507
2447,419	2442,748	2438,095	2433,46	2428,843
11,88374	11,93493	11,986	12,03696	12,0878
0,527913	0,528472	0,529029	0,529584	0,530137
46,75639	46,46699	46,18085	45,89792	45,61814
1	1	0	0	0
19,60321	19,84443	20,08639	20,32906	20,57242
14310	14486	14663	14840	15017
523	524	525	526	527
18496,92	18493,73	12342,11	12355,26	12368,42
0,000436	0,000436	0,000291	0,000291	0,000292

Analizzando questi ultimi risultati si può notare che i valori ricavati sono inferiori rispetto a quelli ottenuti adottando l'approssimazione, questo perché gli anni di vita risultano sempre maggiori (anche se in alcuni casi di poco) e attenuano il costo come è mostrato nella formula di calcolo dei costi di impianto. Il grafico dei costi d'impianto ottenuto in questo caso, mostra come il tratto ondulato nel caso precedente ( dall'iterazione 4 all'iterazione 50) risulta crescente.

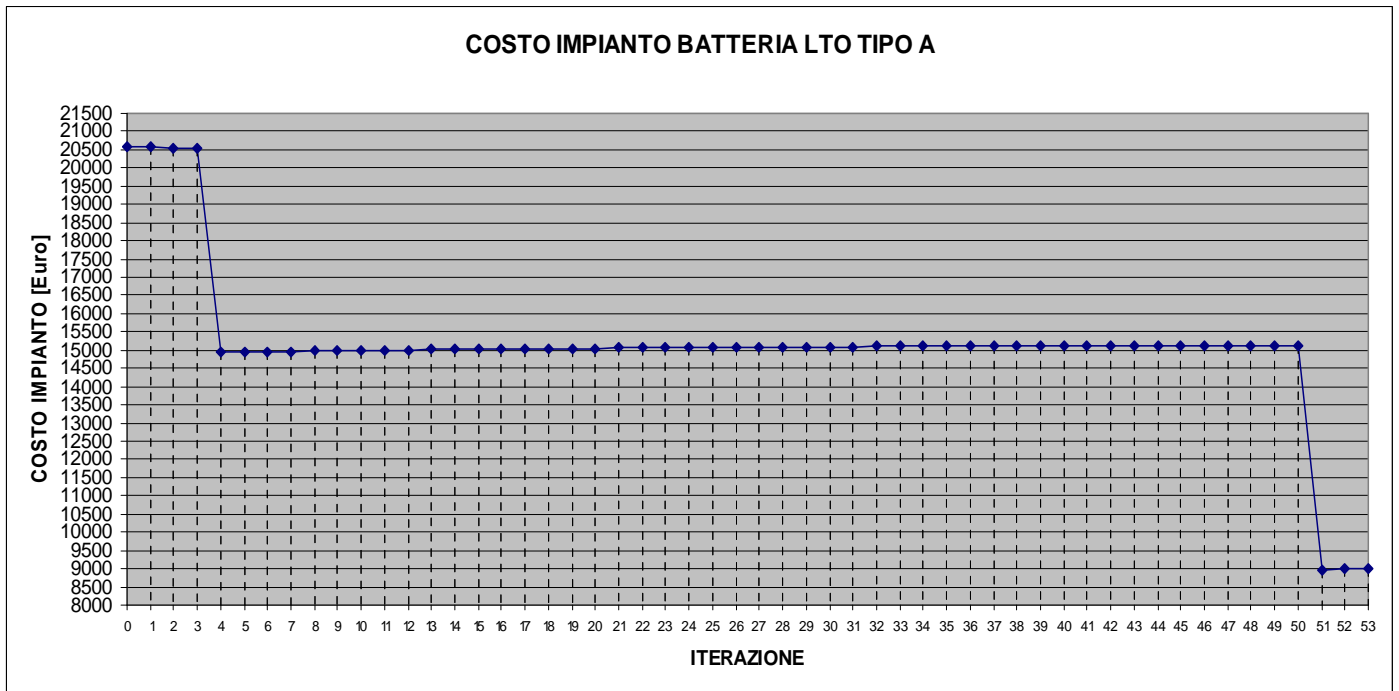


Figura 5.7 - Costi di impianto per una batteria gli ioni di litio LTO di tipo A senza approssimare per difetto gli anni di vita del sistema di accumulo

Si conclude che i punti più bassi, che si possono osservare nei grafici dei costi dove è stata adottata l'approssimazione, rappresentano quei casi in cui la durata vitale in anni della batteria ha un valore che è più vicino a quello non approssimato e, più mi discosto dall'approssimazione più i costi si gonfiano. Come esempio si è evidenziato come, nel caso senza approssimazione, all'iterazione 14, ho una durata pari a 10,016 che è stato approssimato ovviamente a 10. La differenza in questo caso è piccolissima e, infatti, i punti che rappresentano i risultati dell'iterazione nel grafico di figura 5.3 e 5.7 sono situati in sostanza nella stessa posizione. Ciò non accade nel caso dell'iterazione 32 dove la durata risultante senza approssimazione è 10,99 ed è stato approssimato a 10.

# SUPERCAPACITORE

Analizziamo i risultati che otterrei se volessi adottare un sistema di accumulo di tipo supercondensatore. Iniziamo calcolando la massa minima richiesta per questo tipo di batteria.

## Dati utilizzati :

## Calcolo dei parametri minimi del sistema di accumulo

Massa minima richiesta [Kg]

Potenza richiesta dal ciclo [W]	1280000
Energia richiesta dal ciclo [Wh]	2906
Potenza specifica del sistema di accumulo scelto[w/kg]	6600
Energia specifica del sistema di accumulo scelto[wh/kg]	2,8
Potenza massima specifica del sistema di accumulo [W/kg]	6600
Energia massima specifica del sistema di accumulo [Wh/kg]	2,8
Numero di cicli del sistema di accumulo dal datasheet	1000000
Massa minima richiesta	1141,939
(Massa iniziale [Kg])	193,9394
Energia minima richiesta del sistema di accumulo [Wh]	2904,327
Coefficiente di manutenzione del sistema di accumulo	1

La massa minima richiesta risulta 1142 Kg. Si può notare che la massa in questione è molto elevata perché l'energia specifica del supercondensatore è molto bassa, ciò vuol dire che devo incrementare di molto la massa iniziale per soddisfare il fabbisogno di energia richiesta dal ciclo. Analizziamo i costi:

## Calcolo dei costi

Calcolo dei costi ad ogni iterazione

Costo del sistema di accumulo al Wh			29,75
Coefficiente di manutenzione del sistema di accumulo			1
Costo dell'energia [€/Wh]			0,0002
Durata vitale dell'impianto in anni [Lp]			20
Tasso del costo del capitale (cr)			0,05
Tasso di interesse (dr)			0,07
Numero dei cicli previsti durante la vita dell'impianto (nc)			14600
Massa minima del sistema di accumulo			1142

## Numero di cicli effettuati - ad ogni iterazione aumenta la massa di 1 Kg

N° ITERAZIONE		0	1
COSTO DEL CAPITALE [Euro]		95128,6	95211,9
COSTO DI ESERCIZIO [Euro]		868,3921092	867,7505158
POTENZA SPECIFICA DISPONIBILE [W/Kg]		1120,84063	1119,860017
ENERGIA SPECIFICA DISPONIBILE [Wh/Kg]		2,543359269	2,543864448
EFFICIENZA		0,878292458	0,878382379
DoD-DEPTH OF DISCHARGE %		99,999	99,94369777
NUMERO DI SOSTITUZIONI		0	0
NUMERO DI CICLI DI VITA		1000430	999262
MASSA [Kg]		1142	1143
COSTO TOTALE [Euro]		95996,99211	96079,65052
COSTO TOTALE PER CICLO [Euro/Wh]		0,002262607	0,002264555

10	11	12	20	21	30	50	51
95961,6	96044,9	96128,2	96794,6	96877,9	97627,6	99293,6	99376,9
862,0271	861,3967	860,7675	855,7733	855,154	849,6281	837,6525	837,0644
1111,111	1110,147	1109,185	1101,549	1100,602	1092,15	1073,826	1072,925
2,548375	2,548872	2,549368	2,55331	2,553799	2,558167	2,567655	2,568122
0,879185	0,879273	0,879361	0,880061	0,880148	0,880922	0,882601	0,882683
98,98739	98,88225	98,77733	97,94583	97,84286	96,92572	94,9473	94,85047
0	0	0	0	0	0	0	0
989401	988376	987366	979773	978884	971477	958633	958115
1152	1153	1154	1162	1163	1172	1192	1193
96823,63	96906,3	96988,97	97650,37	97733,05	98477,23	100131,3	100214
0,002282	0,002284	0,002286	0,002302	0,002304	0,002321	0,00236	0,002362

Figura 5.8 - Costi di impianto del supercapacitore - caso studio 1

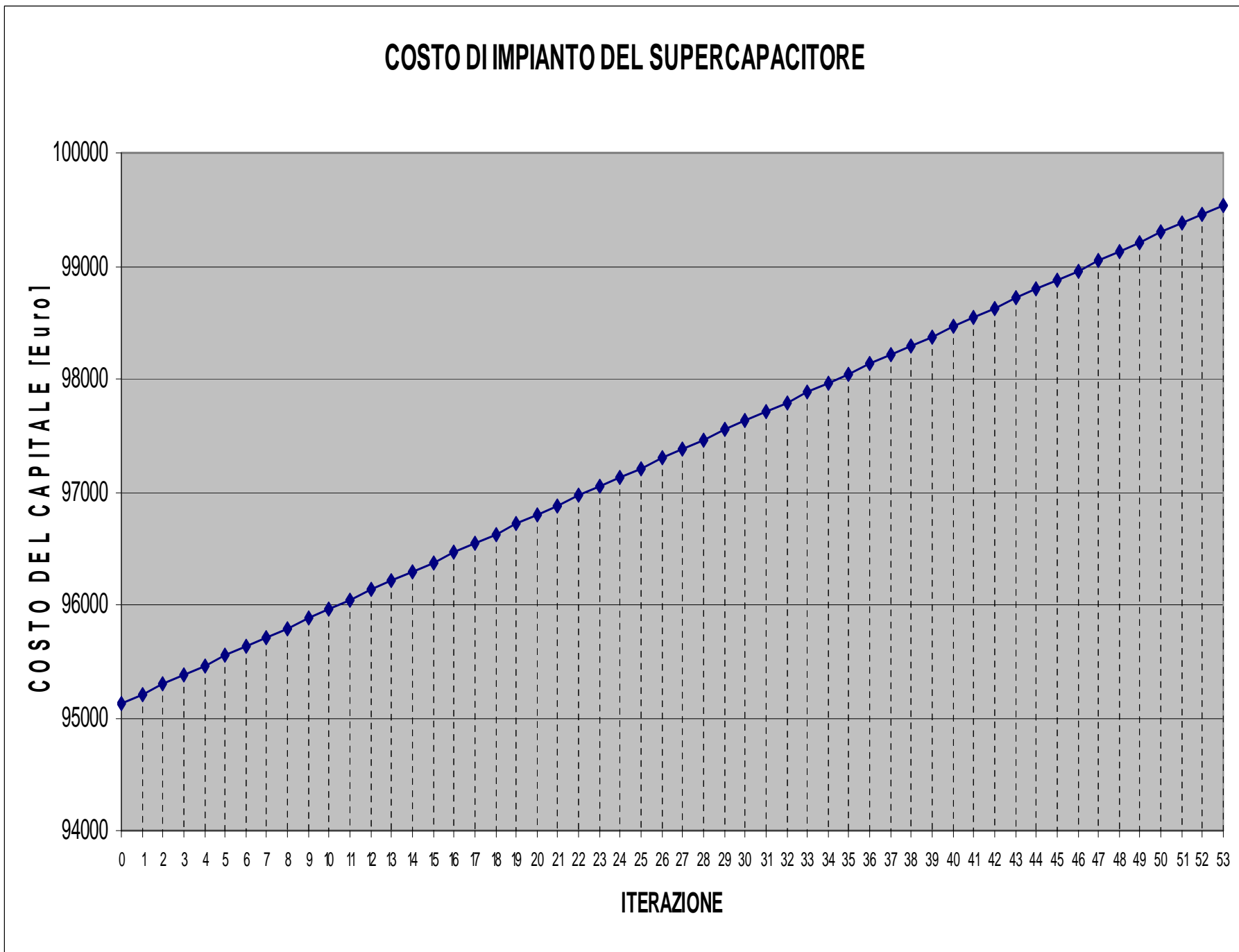




Figura 5.9 - Costi di esercizio del supercapacitore - caso studio 1

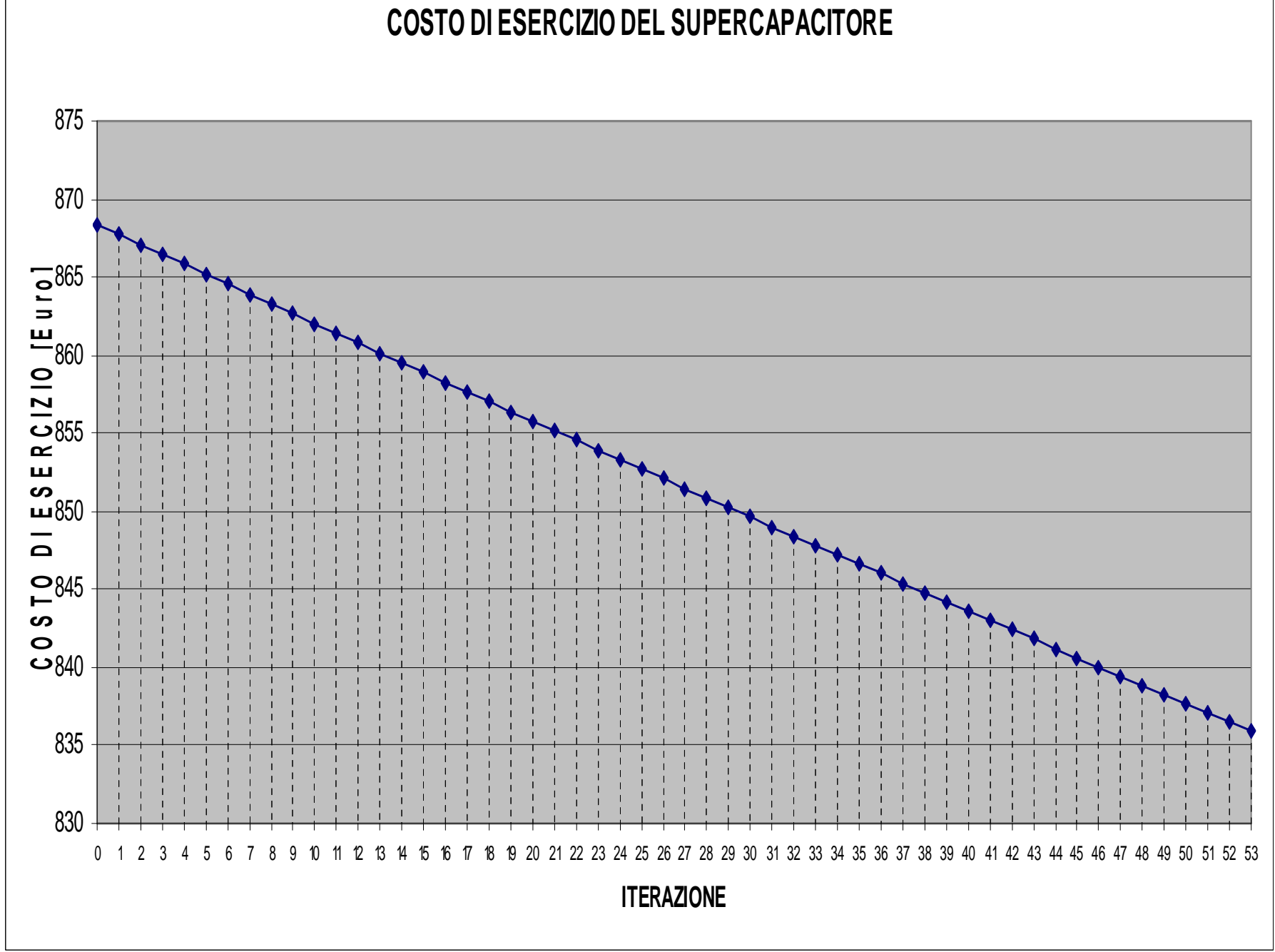


Figura 5.10 - Costi totali del supercapacitore - caso studio 1

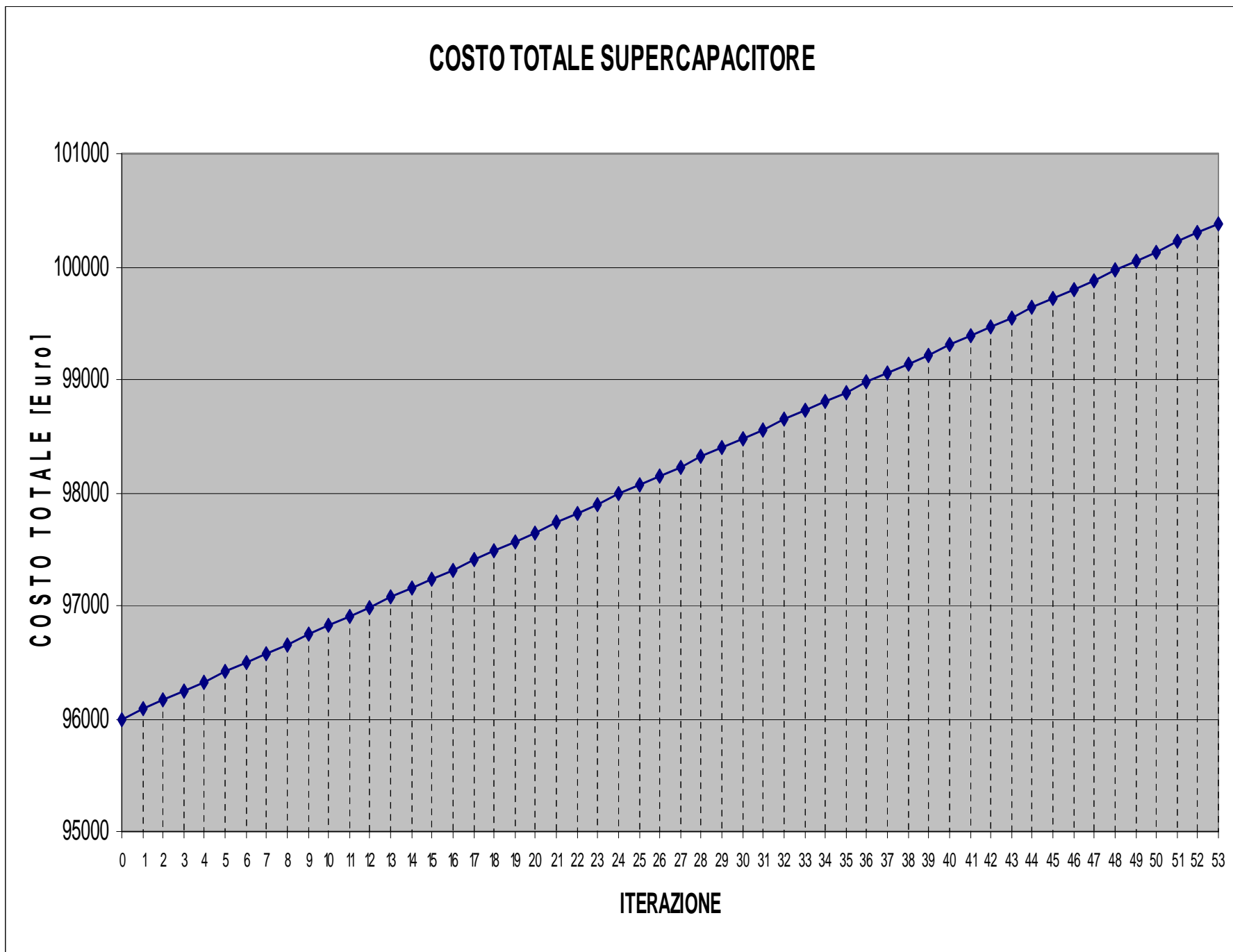
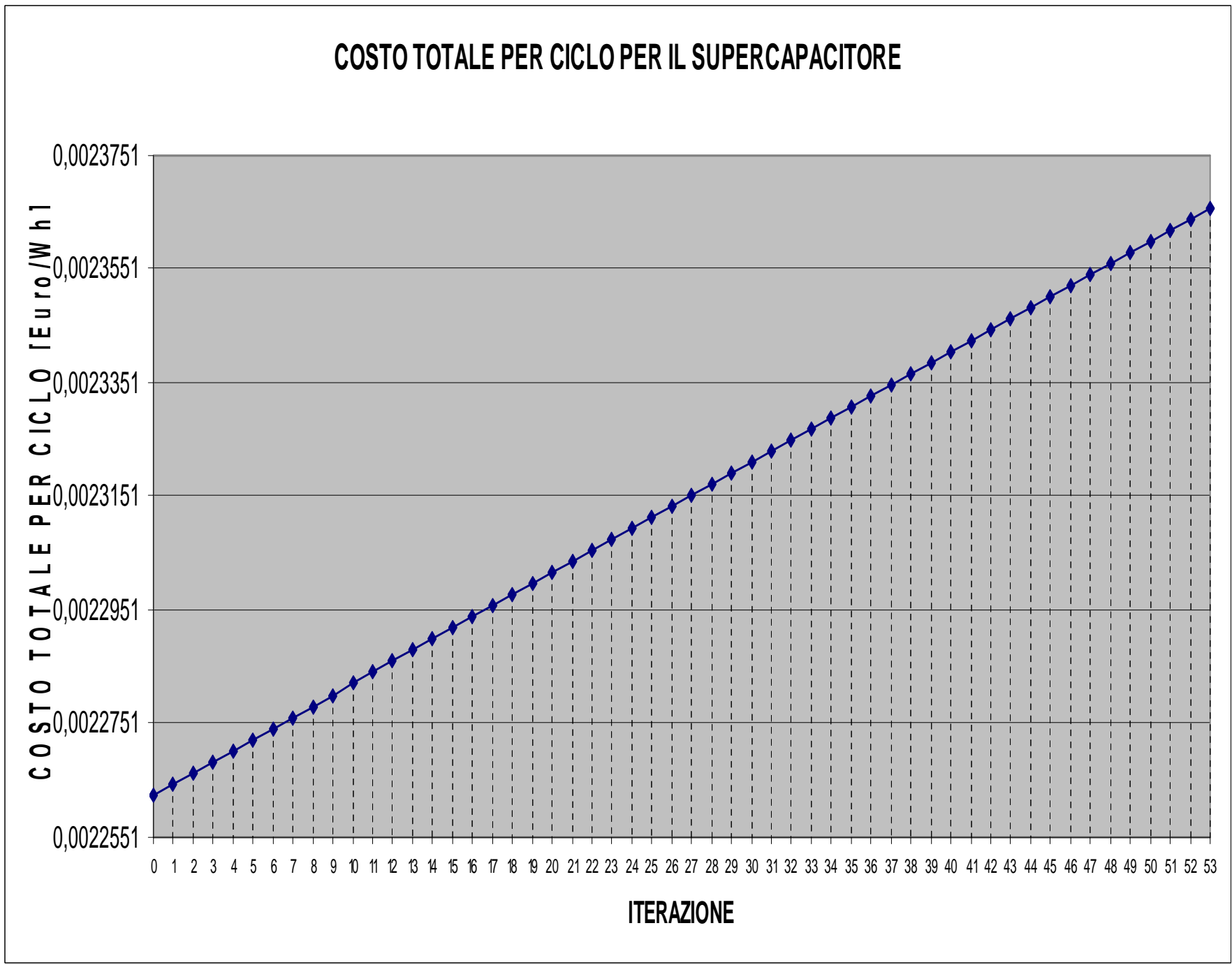


Figura 5.11 - Costi totale per ciclo del supercapacitore - caso studio 1



## Osservazioni :

Il sistema di dimensionamento e di valutazione economica utilizzato indica che , se volessi utilizzare un sistema di accumulo tipo supercondensatore non avrei la necessità di fare sostituzioni future. Tuttavia, come già detto in precedenza, il sistema di accumulo (anche sovradimensionato) non può essere utilizzato o anche solamente tenuto "a scaffale" per un tempo pari alla vita (in anni) dell'impianto. Si possono, tuttavia, fare delle osservazioni generali sui parametri con cui lavora questo sistema di accumulo. Si può notare, infatti, che il supercondensatore lavora con un DoD alto (95 %) quindi il sistema di accumulo viene molto sfruttato per soddisfare i requisiti del ciclo. Si osserva infine che l'efficienza di esercizio è molto alta (0,88), questo vuol dire che i costi di energia per inefficienza sono poco influenti sul costo totale. Il costo totale infatti continua ad aumentare con l'aumentare della massa e quindi con il costo capitale del sistema di accumulo. Il costo aumenta mediamente di 82 euro ad ogni incremento di massa.

# SUPERCAPACITORE IBRIDO

Analizziamo i risultati che otterrei se volessi adottare un supercapacitore ibrido. Iniziamo calcolando la massa minima richiesta.

**Dati utilizzati :**

## Calcolo dei parametri minimi del sistema di accumulo

Massa minima richiesta [Kg]

Potenza richiesta dal ciclo [W]	1280000
Energia richiesta dal ciclo [Wh]	2906
Potenza specifica del sistema di accumulo scelto[w/kg]	1850
Energia specifica del sistema di accumulo scelto[wh/kg]	4
Potenza massima specifica del sistema di accumulo [W/kg]	1850
Energia massima specifica del sistema di accumulo [Wh/kg]	4
Numero di cicli del sistema di accumulo dal datasheet	300000
Massa minima richiesta	1333,892
(Massa iniziale [Kg])	691,8919
Energia minima richiesta del sistema di accumulo [Wh]	2904,339
Coefficiente di manutenzione del sistema di accumulo	1

La massa minima richiesta risulta 1334 Kg. Si può notare che la massa in questione è molto elevata perché l'energia specifica del supercondensatore ibrido è molto bassa, ciò vuol dire che devo incrementare di molto la massa iniziale per soddisfare il fabbisogno di energia richiesta dal ciclo. Si osserva che il peso è maggiore di quella che necessiterebbe per la soluzione non ibrida (1142 kg) poiché quest'ultima ha una potenza specifica superiore . Analizziamo i costi:

## Calcolo dei costi

Calcolo dei costi ad ogni iterazione

Costo del sistema di accumulo al Wh	68
Coefficiente di manutenzione del sistema di accumulo	1
Costo dell'energia [€/Wh]	0,0002
Durata vitale dell'impianto in anni [Lp]	20
Tasso del costo del capitale (cr)	0,05
Tasso di interesse (dr)	0,07
Numero dei cicli previsti durante la vita dell'impianto (nc)	14600
Massa minima del sistema di accumulo	1334

## Numero di cicli effettuati -ad ogni iterazione aumenta la massa di 1 Kg

N° ITERAZIONE	0	1
COSTO DEL CAPITALE [Euro]	362848	363120
COSTO DI ESERCIZIO [Euro]	2278,33981	2276,968804
POTENZA SPECIFICA DISPONIBILE [W/Kg]	959,5202399	958,8014981
ENERGIA SPECIFICA DISPONIBILE [Wh/Kg]	2,177491303	2,178873644
EFFICIENZA	0,680684411	0,680876561
DoD-DEPTH OF DISCHARGE %	99,999	99,90386694
NUMERO DI SOSTITUZIONI	0	0
NUMERO DI CICLI DI VITA	300100	299649
MASSA [Kg]	1334	1335
COSTO TOTALE [Euro]	365126,3398	365396,9688
COSTO TOTALE PER CICLO [Euro/Wh]	0,008605868	0,008612247

8	16	23	31	39	48
365024	367200	369104	371280	373456	375904
2267,413	2256,582	2247,181	2236,524	2225,959	2214,182
953,8003	948,1481	943,2572	937,7289	932,2651	926,1939
2,188506	2,199419	2,208887	2,219616	2,230248	2,242094
0,682216	0,683734	0,685051	0,686545	0,688026	0,689676
98,94536	97,87095	96,94875	95,91469	94,90127	93,78508
0	0	0	0	0	0
296697	293737	291495	289312	287515	285935
1342	1350	1357	1365	1373	1382
367291,4	369456,6	371351,2	373516,5	375682	378118,2
0,008657	0,008708	0,008753	0,008804	0,008855	0,008912

Figura 5.12 - Costi di impianto del supercapacitore ibrido - caso studio 1

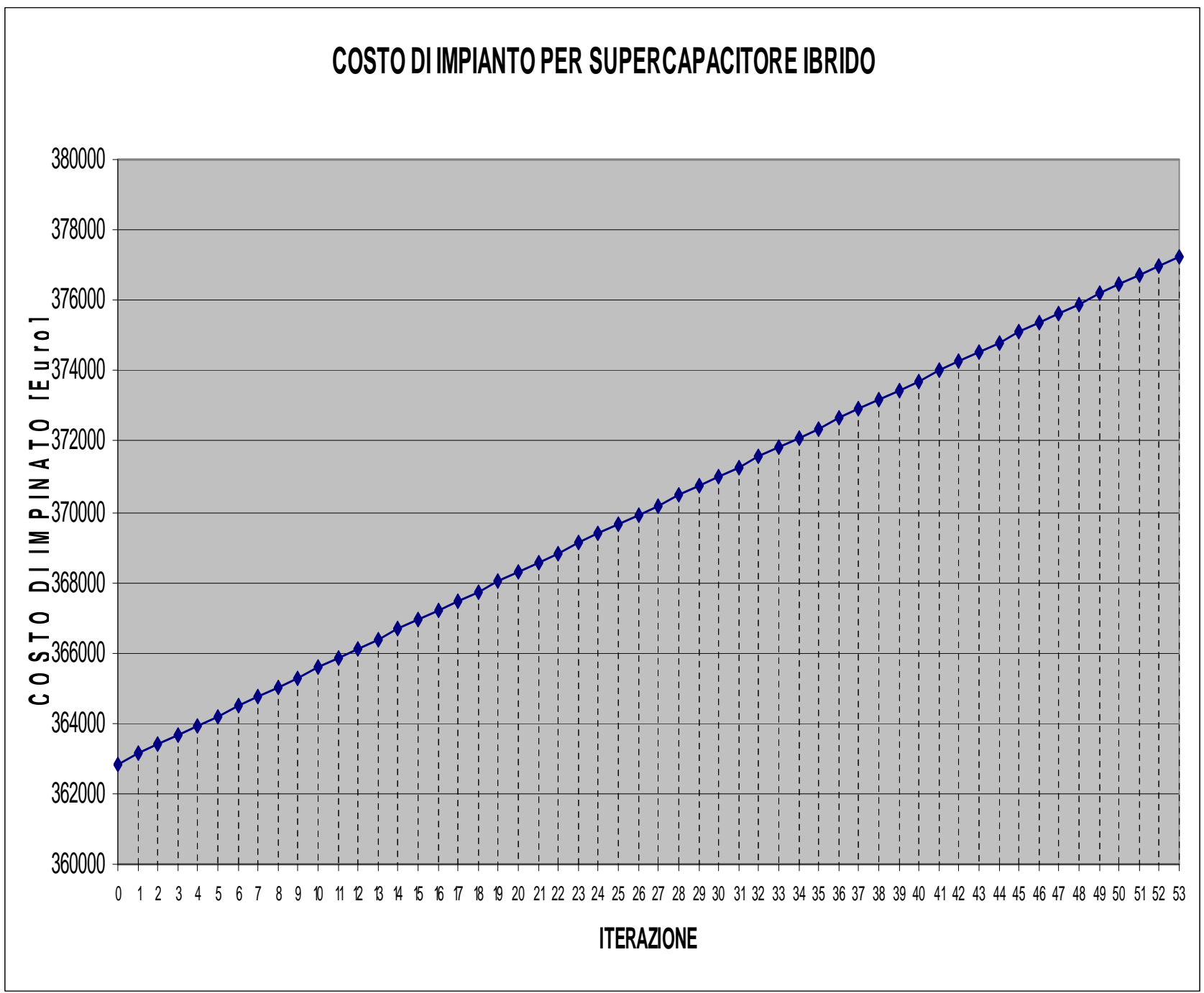


Figura 5.13 - Costi di esercizio del supercapacitore ibrido - caso studio 1

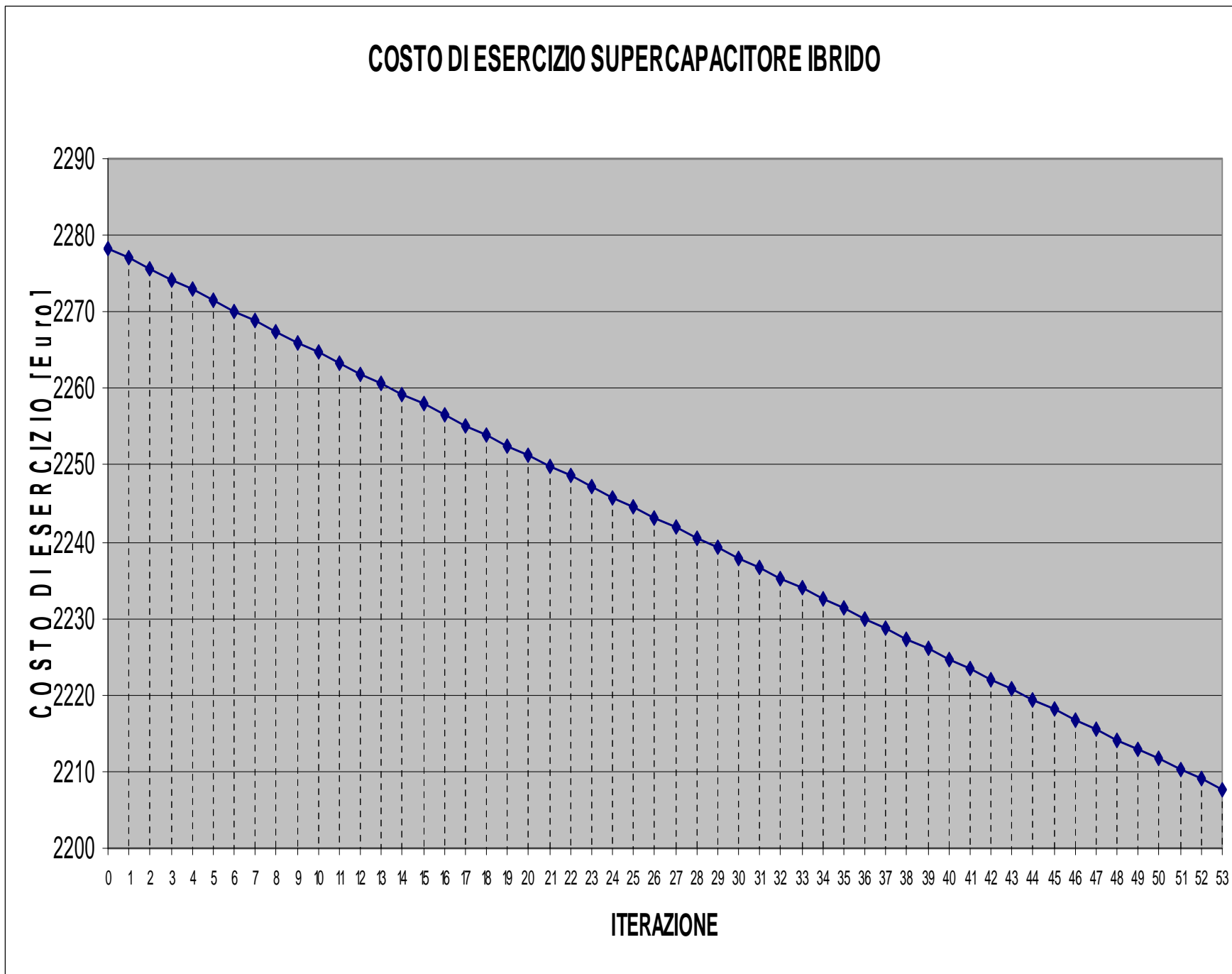




Figura 5.14 - Costi totali del supercapacitore ibrido - caso studio 1

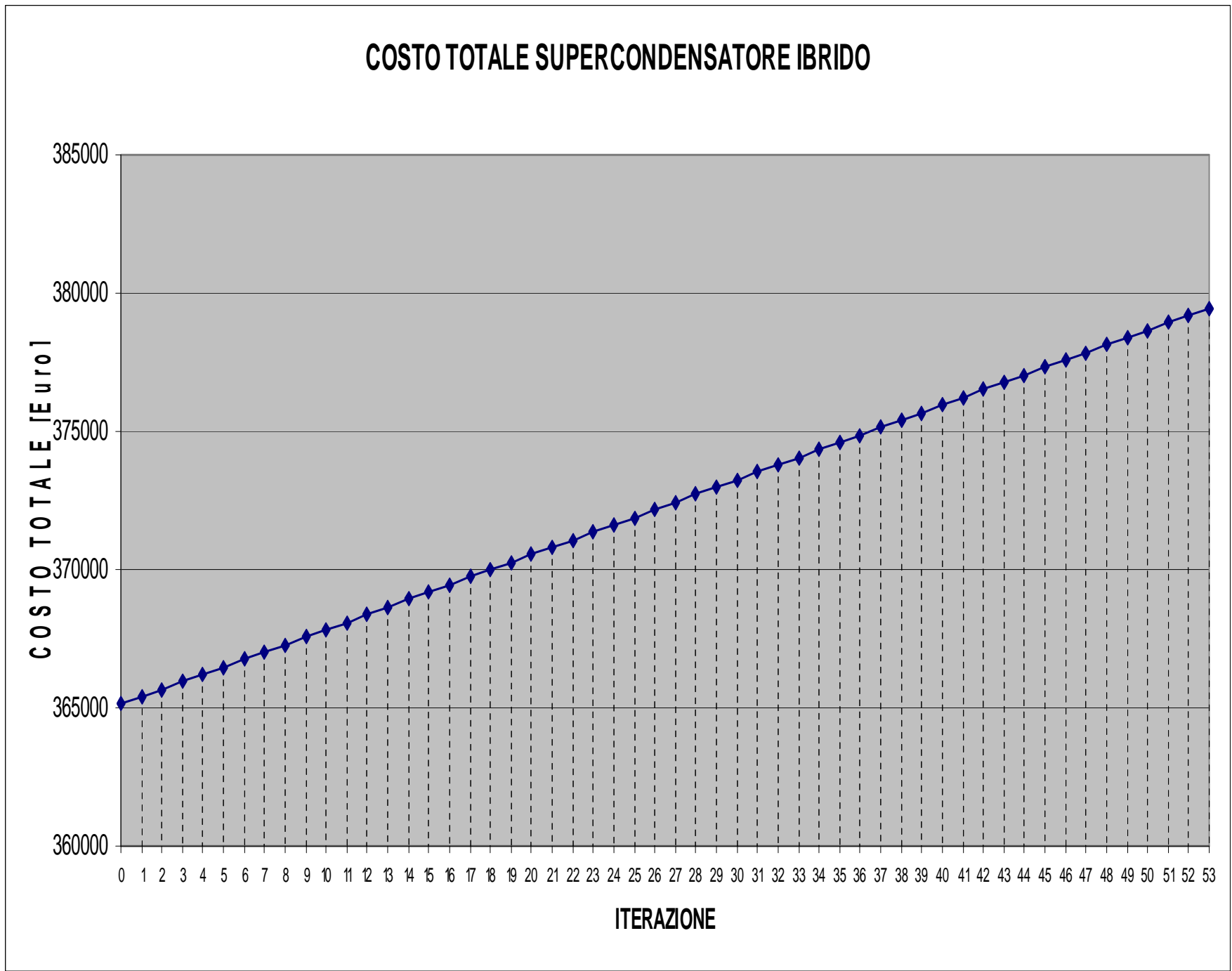
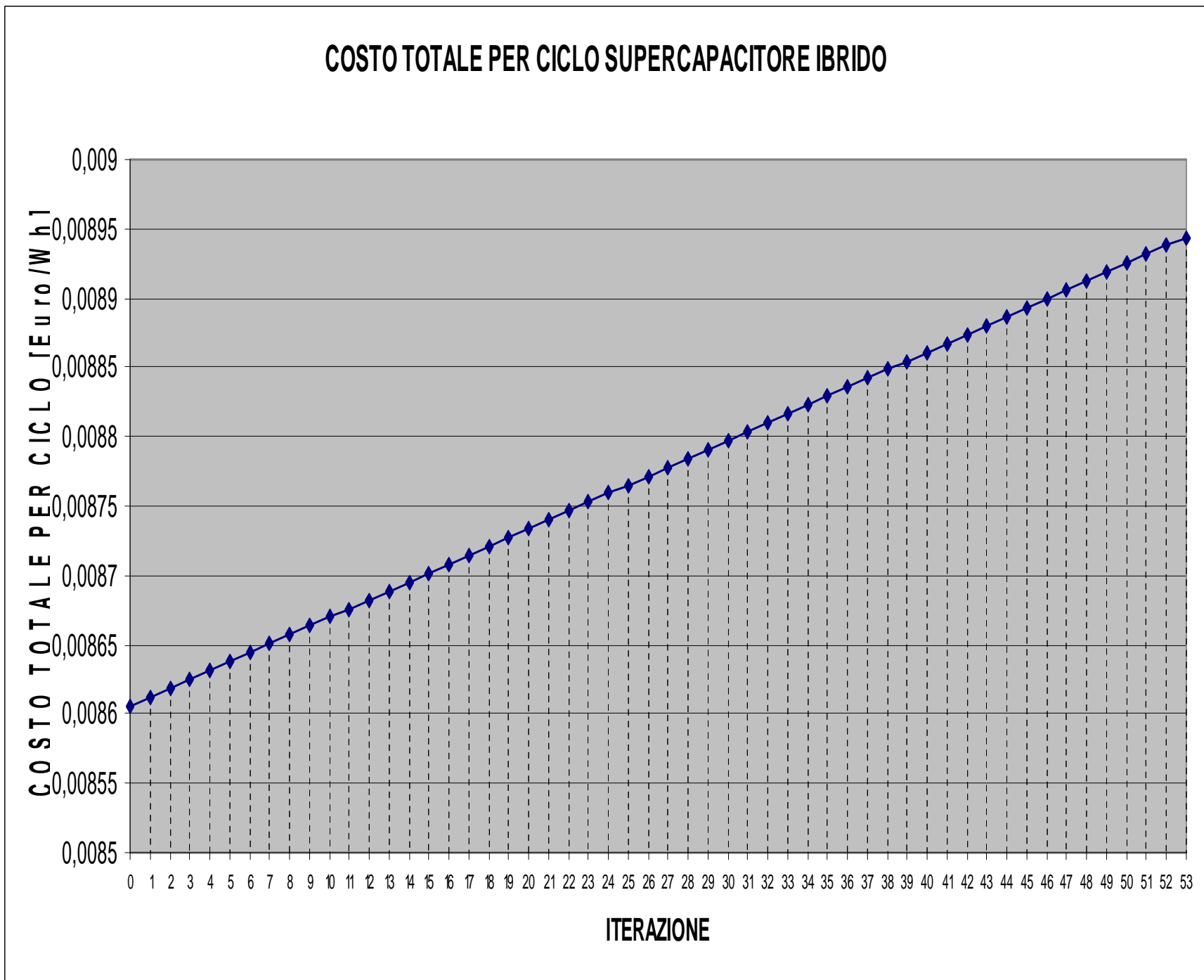


Figura 5.15 - Costi totali per ciclo del supercapacitore ibrido - caso studio 1



## Osservazioni :

Il sistema di dimensionamento e di valutazione economica utilizzato indica che , se volessi utilizzare un sistema di accumulo tipo supercondensatore ibrido non avrei la necessità di fare sostituzioni future. Tuttavia, come già detto in precedenza, il sistema di accumulo (anche sovradimensionato) non può essere utilizzato o anche solamente tenuto "a scaffale" per un tempo pari alla vita (in anni) dell'impianto. Si possono, tuttavia, fare delle osservazioni generali sui parametri con cui lavora questo sistema di accumulo. La soluzione ibrida con il supercondensatore ha lo svantaggio rispetto a quella non ibrida di aumentare il peso (nel nostro caso di 192 Kg) e di costare molto di più. Si può notare che il supercondensatore ibrido lavora con un DoD del 96% che è maggiore di quello ottenuto per la soluzione non ibrida, ciò vuol dire che con la soluzione ibrida il supercondensatore viene sfruttato di più. Il supercondensatore ibrido non raggiungi i livelli di efficienza del supercondensatore (0,68% contro lo 0,87%) , tuttavia i costi di energia per inefficienza sono poco influenti sul costo totale. Il costo totale infatti continua ad aumentare con l'aumentare della massa e quindi con il costo capitale del sistema di accumulo. Il costo aumenta mediamente di 270 euro ad ogni incremento di massa di un kilo.

## **BATTERIA AGLI IONI DI LITIO TIPO B** **-con bassa potenza specifica e alta energia specifica-**

Analizziamo i risultati che otterrei se volessi adottare una batteria agli ioni di litio con maggiore energia specifica ma minore potenza rispetto a quella di tipo A. Iniziamo calcolando la massa minima richiesta per questo tipo di batteria.

### **Dati utilizzati :**

### **Calcolo dei parametri minimi del sistema di accumulo**

Massa minima richiesta [Kg]

Potenza richiesta dal ciclo [W]	1280000
Energia richiesta dal ciclo [Wh]	2906
Potenza specifica del sistema di accumulo scelto[w/kg]	300
Energia specifica del sistema di accumulo scelto[wh/kg]	115
Potenza massima specifica del sistema di accumulo [W/kg]	300
Energia massima specifica del sistema di accumulo [Wh/kg]	115
Numero di cicli del sistema di accumulo dal datasheet	2500
Massa minima richiesta	4266,667
(Massa iniziale [Kg])	4266,667
Energia minima richiesta del sistema di accumulo [Wh]	96357,16
Coefficiente di manutenzione del sistema di accumulo	1,3

La massa minima richiesta è di 4267 Kg. La batteria agli ioni di litio in questione ha un'elevata energia specifica ma bassa potenza specifica, per questo motivo la massa risulta elevata in quanto la nostra applicazione richiede più potenza che energia.

(massa =  $P_{ciclo} \backslash P_{spec}$  ). Analizziamo i costi:

## Calcolo dei costi

Calcolo dei costi ad ogni iterazione

Costo del sistema di accumulo al Wh		0,18
Coefficiente di manutenzione del sistema di accumulo		1,3
Costo dell'energia [€/Wh]		0,0002
Durata vitale dell'impianto in anni [Lp]		20
Tasso del costo del capitale (cr)		0,05
Tasso di interesse (dr)		0,07
Numero dei cicli previsti durante la vita dell'impianto (nc)		14600
Massa minima del sistema di accumulo		4267

## Numero di cicli effettuati - ad ogni iterazione aumenta la massa di 1 Kg

N° ITERAZIONE		0
COSTO DEL CAPITALE [Euro]		114824,97
COSTO DI ESERCIZIO [Euro]		3592,774957
POTENZA SPECIFICA DISPONIBILE [W/Kg]		299,9765643
ENERGIA SPECIFICA DISPONIBILE [Wh/Kg]		22,58890805
EFFICIENZA		0,496462711
DoD-DEPTH OF DISCHARGE %		3,014933445
NUMERO DI SOSTITUZIONI		0
DURATA VITALE IN ANNI		71
NUMERO DI CICLI DI VITA		52390
MASSA [Kg]		4267
COSTO TOTALE [Euro]		118417,745
COSTO TOTALE PER CICLO [Euro/Wh]		0,002791055

6	10	13	17	21	24	28
114986,4	115094,1	115174,8	115282,4	115390,1	115470,8	115578,5
3589,152	3586,749	3584,953	3582,567	3580,191	3578,414	3576,054
299,5553	299,2752	299,0654	298,7862	298,5075	298,2988	298,021
22,68242	22,74468	22,79134	22,85348	22,91557	22,96209	23,02406
0,49697	0,497307	0,497559	0,497893	0,498226	0,498475	0,498806
2,998288	2,987284	2,979079	2,968204	2,957401	2,949346	2,938668
0	0	0	0	0	0	0
71	71	71	71	71	71	72
52431	52458	52478	52505	52532	52551	52578
4273	4277	4280	4284	4288	4291	4295
118575,6	118680,8	118759,8	118865	118970,3	119049,2	119154,5
0,002795	0,002797	0,002799	0,002802	0,002804	0,002806	0,002808

32	36	39	43	47	51
115686,1	115793,7	115874,5	115982,1	116089,7	116197,4
3573,703	3571,362	3569,611	3567,285	3564,968	3562,659
297,7437	297,4669	297,2596	296,9838	296,7084	296,4335
23,08597	23,14781	23,19415	23,25588	23,31755	23,37915
0,499136	0,499464	0,499709	0,500035	0,50036	0,500684
2,928061	2,917524	2,909666	2,899249	2,888901	2,87862
0	0	0	0	0	0
72	72	72	72	72	72
52604	52630	52649	52675	52700	52726
4299	4303	4306	4310	4314	4318
119259,8	119365,1	119444,1	119549,4	119654,7	119760
0,002811	0,002813	0,002815	0,002818	0,00282	0,002823

Figura 5.16 - Costi di impianto per batteria agli ioni di litio tipo b - caso studio 1

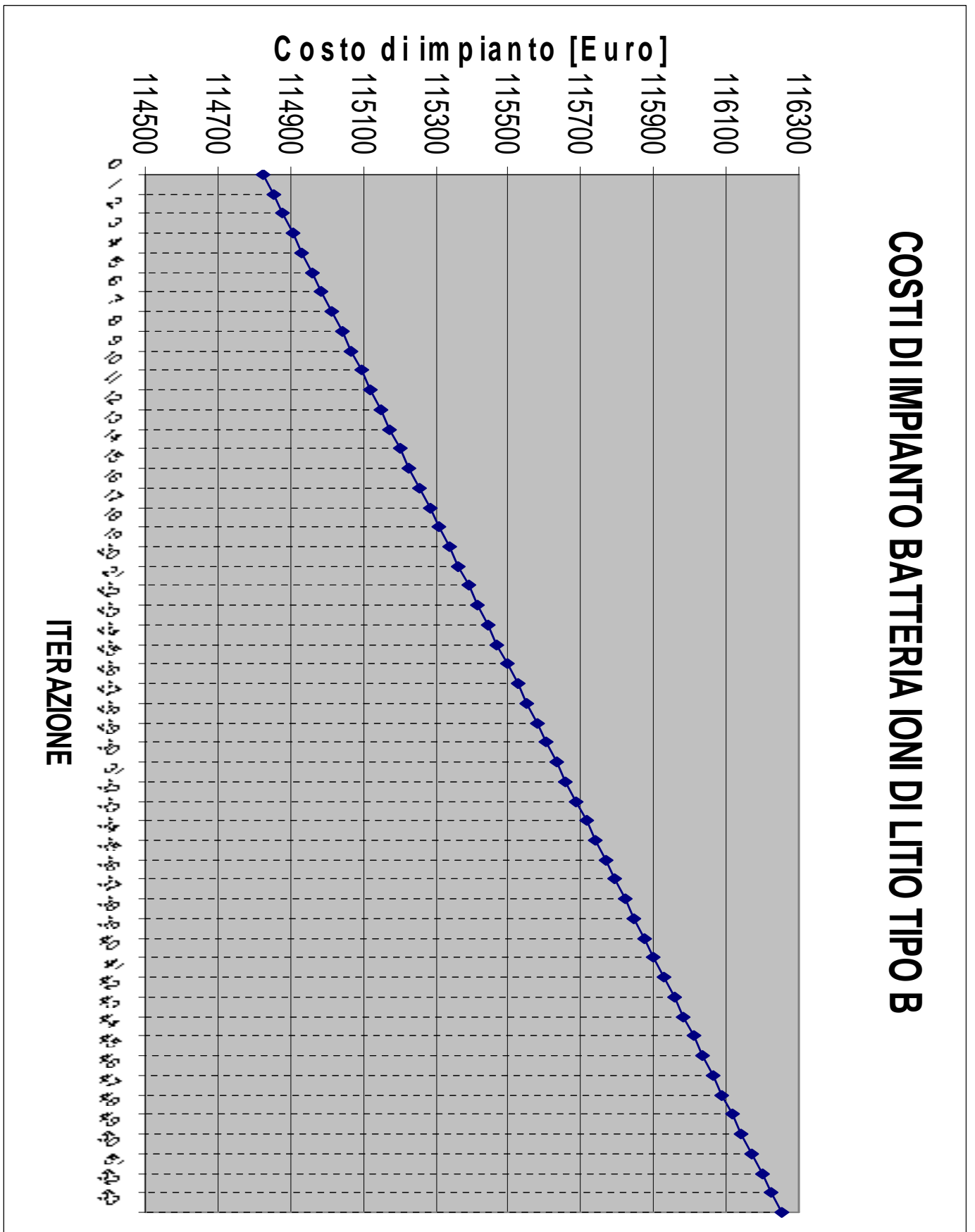


Figura 5.17 - Costi di esercizio per batteria agli ioni di litio tipo b - caso studio 1

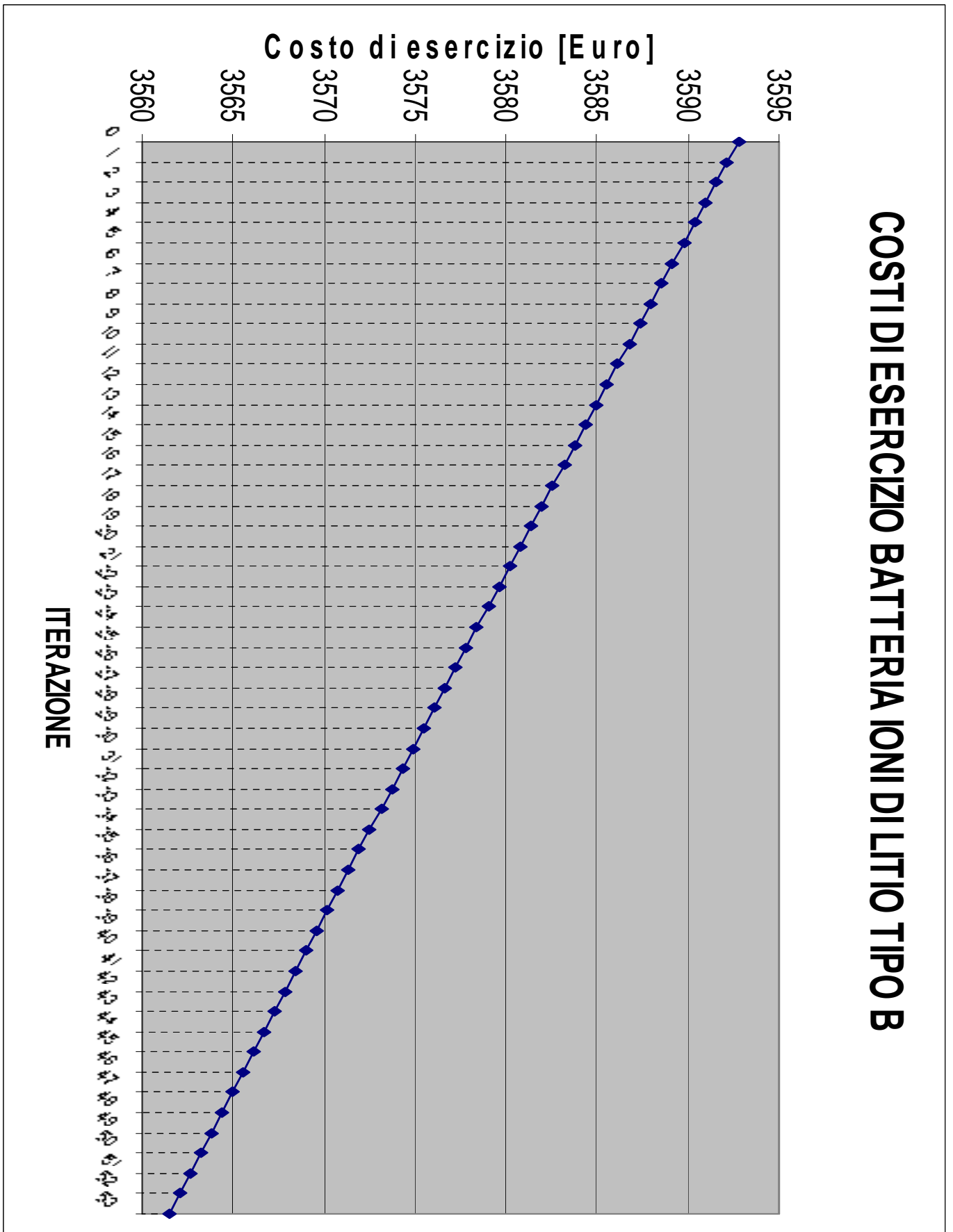




Figura 5.18 - Costi totali per batteria agli ioni di litio tipo b - caso studio 1

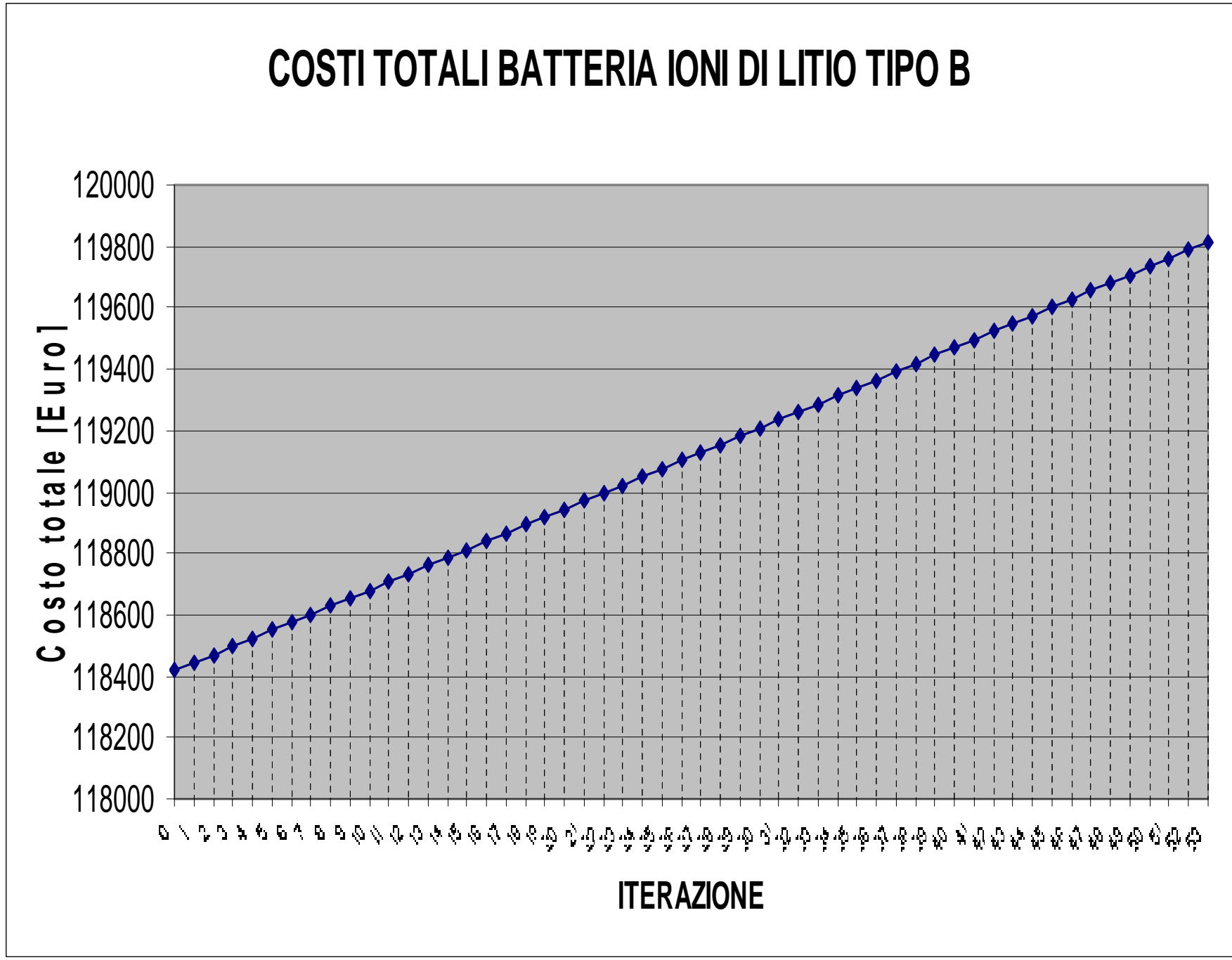
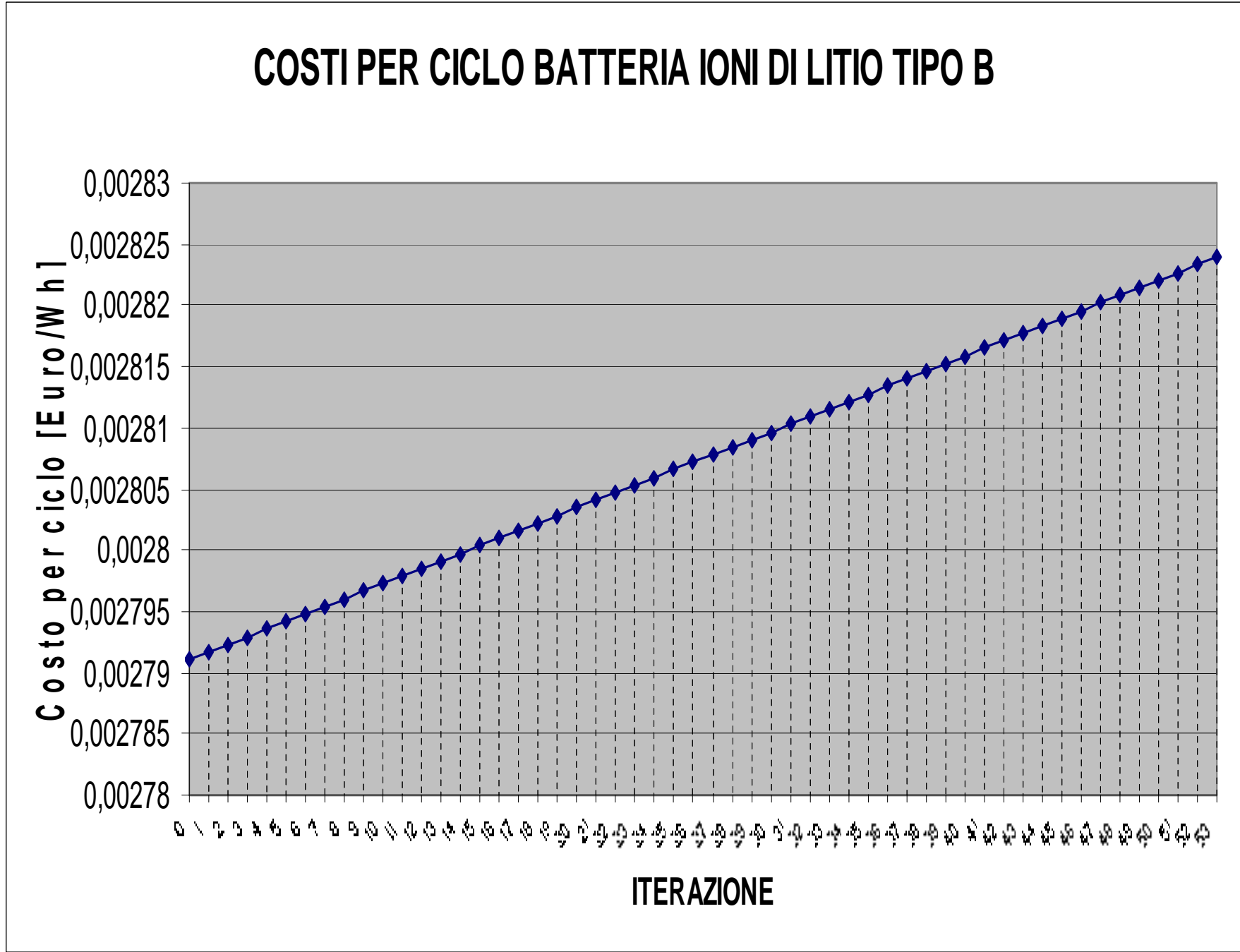


Figura 5.19 - Costi totali per ciclo batteria agli ioni di litio tipo b - caso studio 1



## Osservazioni :

Se volessi utilizzare una batteria agli ioni di litio di questo tipo non avrei la necessità di fare sostituzioni future ma, siccome la durata vitale media di un sistema di accumulo non supera mai i 10 anni, la scelta di adoperare un solo sistema di accumulo per tutta la durata dell'impianto (20 anni) è impossibile. Si possono fare ,tuttavia, delle osservazioni su come lavora questo sistema di accumulo. Si può notare che il DoD è molto piccolo (va dal 3% al 2,9%) quindi la batteria viene poco utilizzata ed inoltre in maniera non ottimale in quanto l'efficienza è allo 0,49- 0,50. E' importante notare che al crescere della massa aumenta l'efficienza perché la potenza specifica del sistema di accumulo diminuisce come si evince dalla curva 2 del capitolo precedente. L'andamento crescente dei costi totali, quindi, deriva dal fatto che più aumento la massa più il costo totale aumenta perché il costo proprio capitale della batteria, legato essenzialmente alla massa, cresce e, questo costo capitale, varia più velocemente rispetto a quello di esercizio per inefficienza che man mano diminuisce. Il costo totale aumenta mediamente di 26 euro per ogni aumento di massa di 1 kg.

## **BATTERIA AGLI IONI DI LITIO TIPO C**

### **- con alta potenza specifica e energia specifica modesta-**

Analizziamo i risultati che otterrei se volessi adottare una batteria agli ioni di litio che punta ad avere sia una maggiore potenza specifica rispetto a quella di tipo B a discapito di una moderata energia specifica. Iniziamo calcolando la massa minima richiesta per questo tipo di batteria.

**Dati utilizzati :**

#### **Calcolo dei parametri minimi del sistema di accumulo**

Massa minima richiesta [Kg]

Potenza richiesta dal ciclo [W]	1280000
Energia richiesta dal ciclo [Wh]	2906
Potenza specifica del sistema di accumulo scelto[w/kg]	1900
Energia specifica del sistema di accumulo scelto[wh/kg]	90
Potenza massima specifica del sistema di accumulo [W/kg]	1900
Energia massima specifica del sistema di accumulo [Wh/kg]	90
Numero di cicli del sistema di accumulo dal datasheet	3000
Massa minima richiesta	673,6842
(Massa iniziale [Kg])	673,6842
Energia minima richiesta del sistema di accumulo [Wh]	11906,83
Coefficiente di manutenzione del sistema di accumulo	1,3

La massa minima richiesta è di 674 Kg. Analizziamo i costi:

## Calcolo dei costi

Calcolo dei costi ad ogni iterazione

Costo del sistema di accumulo al Wh			0,23
Coefficiente di manutenzione del sistema di accumulo			1,3
Costo dell'energia [€/Wh]			0,0002
Durata vitale dell'impianto in anni [Lp]			20
Tasso del costo del capitale (cr)			0,05
Tasso di interesse (dr)			0,07
Numero dei cicli previsti durante la vita dell'impianto (nc)			14600
Massa minima del sistema di accumulo			674

**Numero di cicli effettuati -ad ogni iterazione aumenta la massa di 1 Kg : 53**

N° ITERAZIONE		0	1
COSTO DEL CAPITALE [Euro]		18137,34	18164,25
COSTO DI ESERCIZIO [Euro]		3591,766383	3587,949436
POTENZA SPECIFICA DISPONIBILE [W/Kg]		1899,109792	1896,296296
ENERGIA SPECIFICA DISPONIBILE [Wh/Kg]		17,69861618	17,77582918
EFFICIENZA		0,496604065	0,497139021
DoD-DEPTH OF DISCHARGE %		24,3610724	24,21932132
NUMERO DI SOSTITUZIONI		0	0
DURATA VITALE IN ANNI		31	32
NUMERO DI CICLI DI VITA		23305	23458
MASSA [Kg]		674	675
COSTO TOTALE [Euro]		21729,10638	21752,19944
COSTO TOTALE PER CICLO [Euro/Wh]		0,000512146	0,00051269

6	7	11	16	21	26	27
18298,8	18325,71	18433,35	18567,9	18702,45	18837	18863,91
3569,223	3565,546	3551,056	3533,402	3516,22	3499,469	3496,168
1882,353	1879,589	1868,613	1855,072	1841,727	1828,571	1825,963
18,16	18,23645	18,54103	18,91895	19,29379	19,66559	19,73958
0,499764	0,500279	0,50231	0,504784	0,507192	0,50954	0,510002
23,53265	23,39958	22,8808	22,26125	21,67171	21,11012	21,00098
0	0	0	0	0	0	0
33	33	34	35	36	37	37
24211	24360	24950	25673	26382	27075	27212
680	681	685	690	695	700	701
21868,02	21891,26	21984,41	22101,3	22218,67	22336,47	22360,08
0,000515	0,000516	0,000518	0,000521	0,000524	0,000526	0,000527

43	48	50
19294,47	19429,02	19482,84
3445,309	3430,088	3424,079
1785,216	1772,853	1767,956
20,9073	21,26604	21,40873
0,51713	0,519264	0,520106
19,38557	18,92656	18,74849
0	0	0
40	41	41
29324	29954	30202
717	722	724
22739,78	22859,11	22906,92
0,000536	0,000539	0,00054

Figura 5.20 - Costi di impianto per batteria agli ioni di litio tipo c - caso studio 1

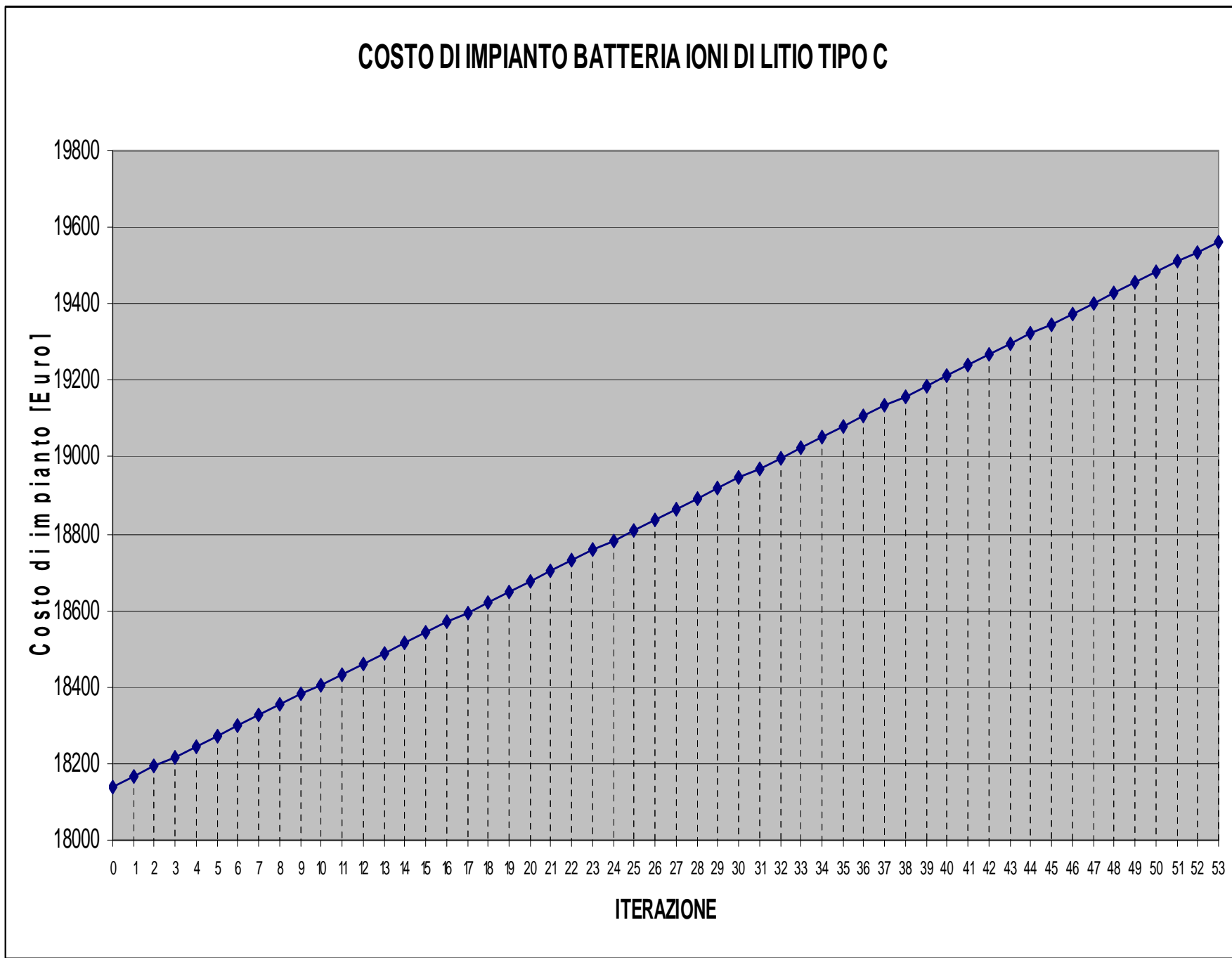


Figura 5.21 - Costi di esercizio per batteria agli ioni di litio tipo c - caso studio 1

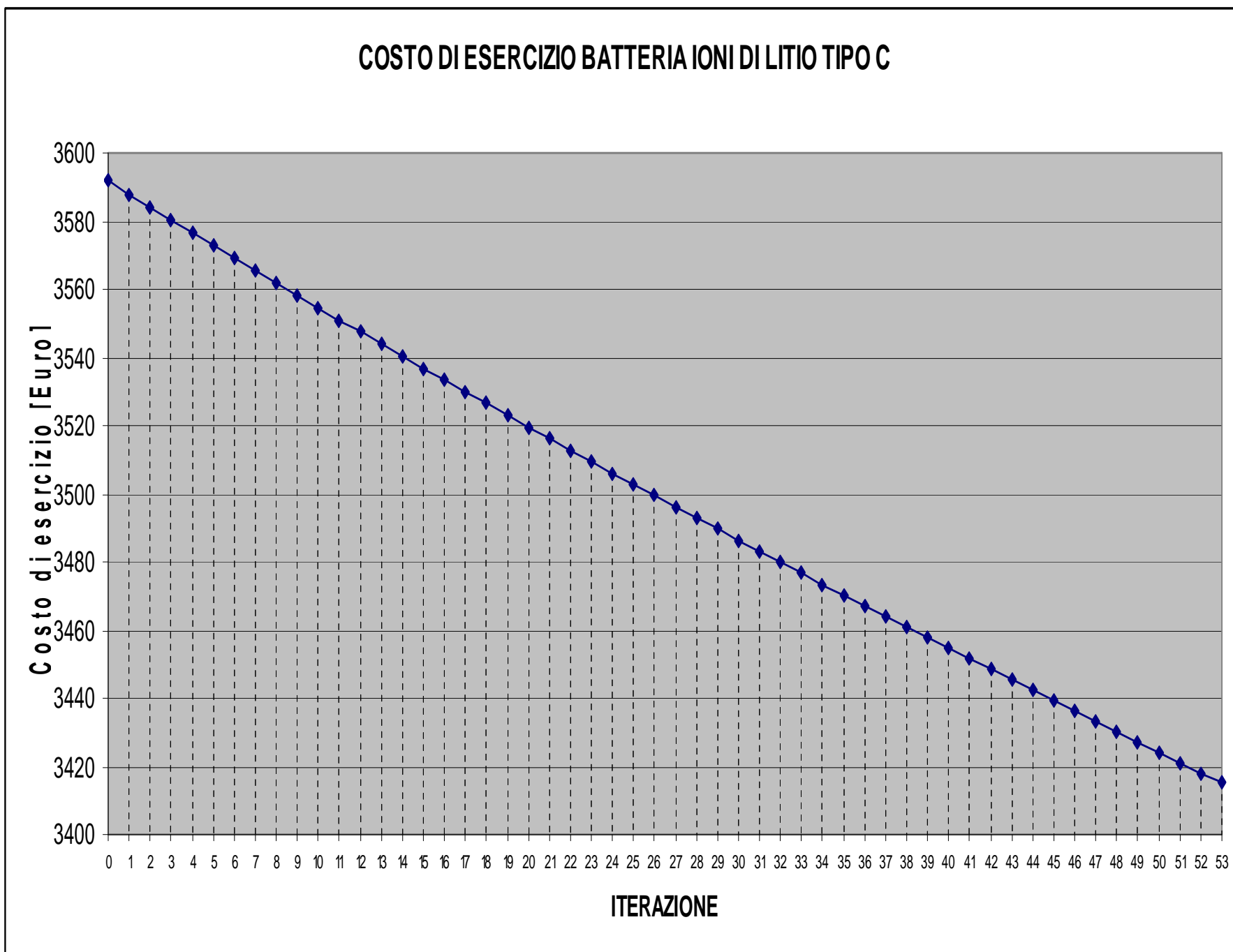




Figura 5.22 - Costi totali per batteria agli ioni di litio tipo c - caso studio 1

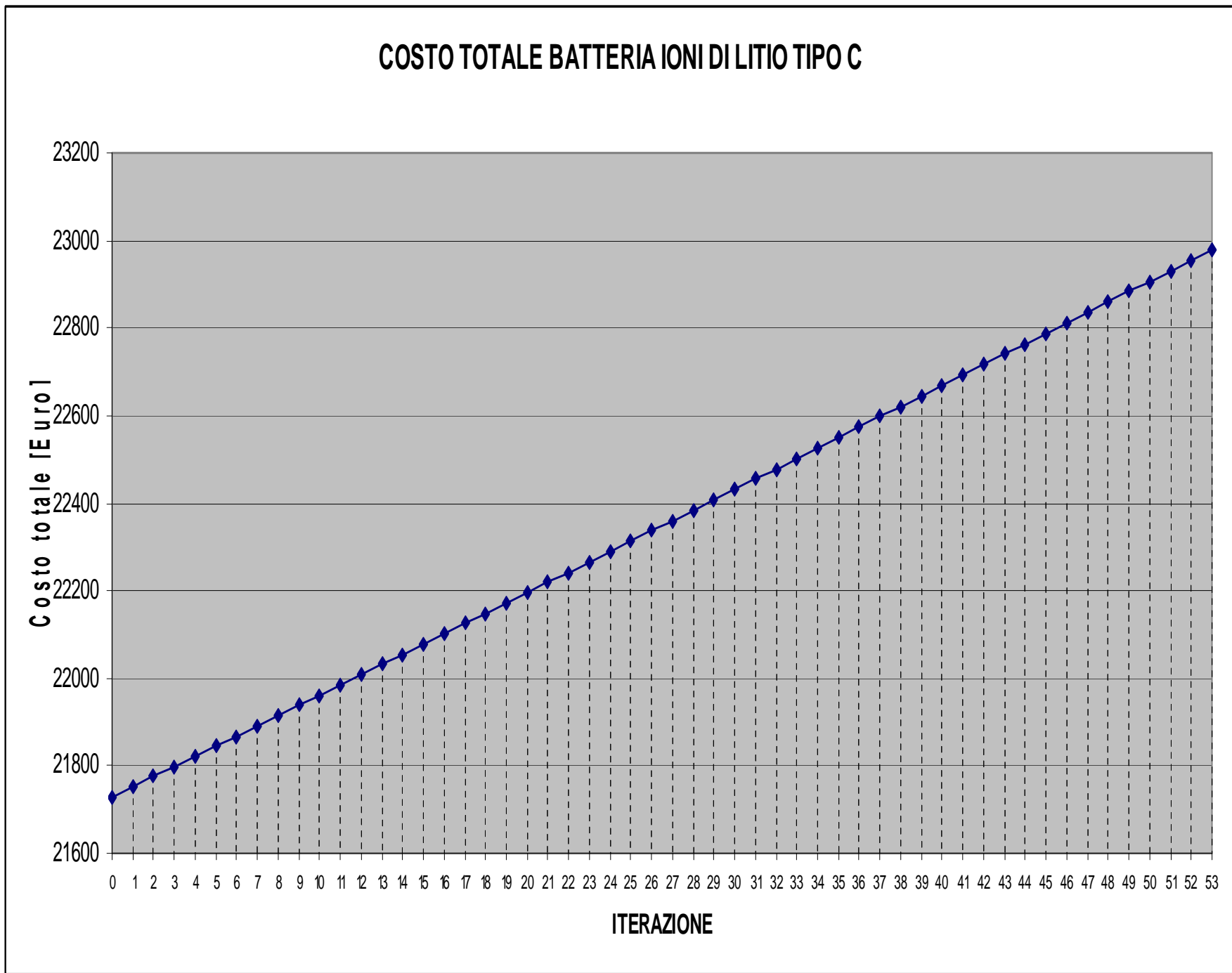
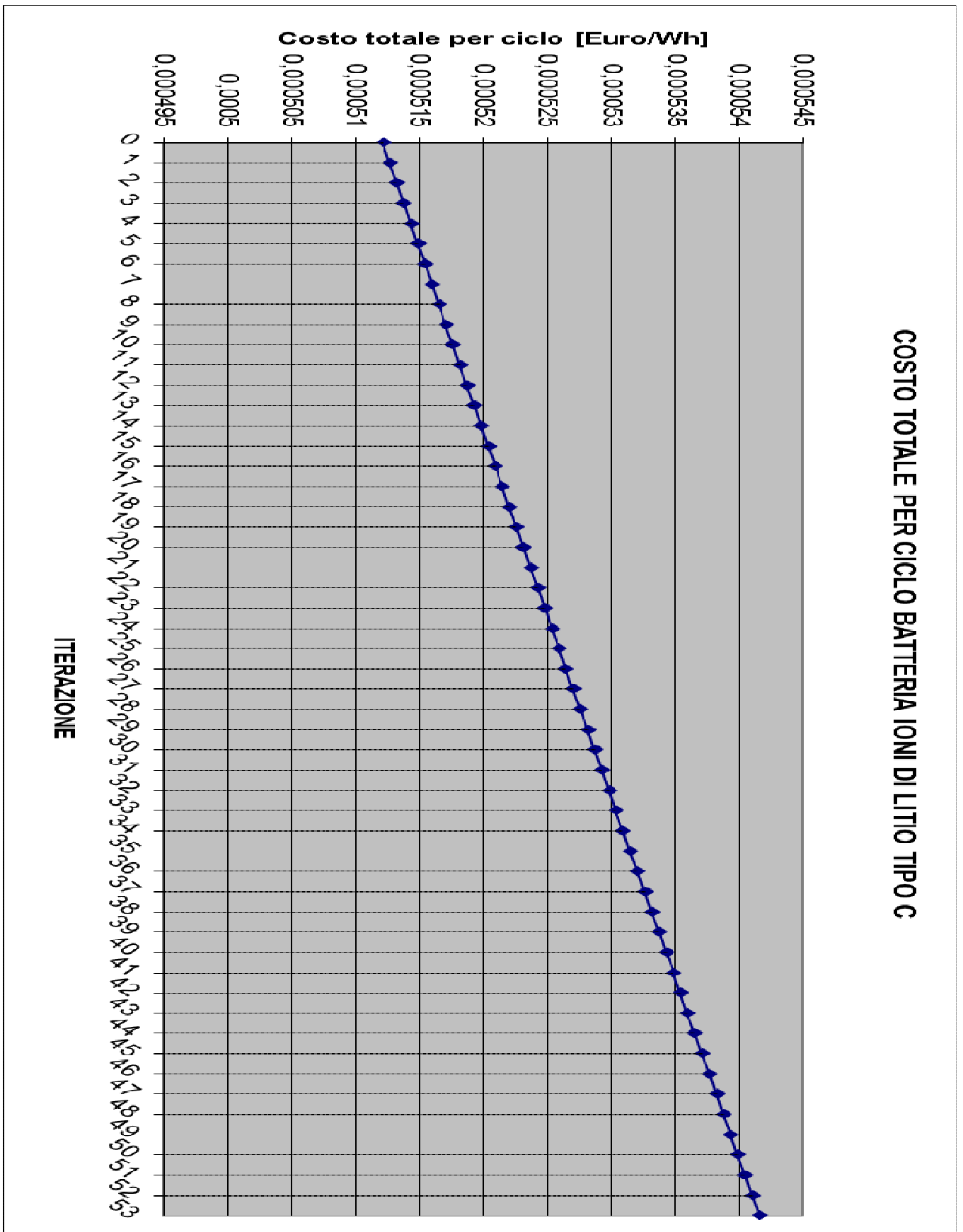


Figura 5.23 - Costi totali per ciclo per batteria agli ioni di litio tipo c - caso studio 1



## **Osservazioni :**

Se volessi utilizzare una batteria agli ioni di litio di questo tipo non avrei la necessità di fare sostituzioni future ma, siccome la durata vitale media di un sistema di accumulo non supera mai i 10 anni, la scelta di adoperare un solo sistema di accumulo per tutta la durata dell'impianto (20 anni) è impossibile. Si possono fare, tuttavia, delle osservazioni su come lavora questo sistema di accumulo.

Il sistema di accumulo viene utilizzato con un DoD di lavoro del 24% -18% che è praticamente la metà di quello ottenuto per una batteria LTO di tipo A e superiore a quello ottenuto per la batteria di tipo B (3%). La batteria agli ioni di litio di tipo C lavora con una efficienza dello 0,49-0,5. E' importante notare che al crescere della massa aumenta l'efficienza perché la potenza specifica del sistema di accumulo diminuisce. L'andamento crescente dei costi totali con l'aumentare della massa deriva dal fatto che il costo dell'acquisto della batteria risulta più influente rispetto a quello per inefficienza di esercizio. Il costo totale aumenta mediamente di 23 euro per iterazione .

## **Conclusioni al caso 1**

La soluzione più economicamente conveniente per il caso in oggetto è quello di adoperare una batteria agli ioni di litio di tipo A con una massa di 478 kg. Bisogna tener conto che la batteria, con una tale massa, dovrà essere sostituita almeno una volta determinando un costo totale che ammonta a 18521 euro. Nel caso ci fossero particolari condizioni per cui è necessario adoperare meno massa possibile, si potrebbe utilizzare lo stesso tipo di batteria con la massa minima necessaria per eseguire il ciclo energetico (474 kg). In quest'ultimo caso, però, il costo totale risulta 24319 euro ed è nettamente superiore rispetto a quello in cui utilizzo una massa di 478 kg. È interessante osservare che un aumento di massa di appena 4 kg, rispetto alla soluzione meno economicamente onerosa, decreta non solo un aumento del costo totale di circa 5798 euro, ma anche l'esigenza di sostituire la batteria una volta in più (due invece di una). Si osserva che la batteria agli ioni di litio LTO di tipo A con una massa di 478 kg lavora con un DoD del 64% (due punti percentuali in meno rispetto a quella da 474 kg) e con un'efficienza dello 0,49 (pari a quella da 474 kg). Tutti gli altri tipi di sistemi di accumulo (ioni di litio tipo B,C, Supercondensatori e Supercondensatori ibridi) sono da scartare poiché, per queste batterie, il sistema di dimensionamento e di valutazione economica utilizzato indica l'assenza della necessità di fare sostituzioni. Quindi, il sistema di accumulo (anche sovradimensionato) dovrebbe avere una durata vitale pari a quella dell'impianto (20 anni) ma ciò è impossibile siccome le batterie hanno una durata media di 10 anni. Si può, tuttavia, osservare che le batterie agli ioni di litio lavorano tutte alla stessa efficienza (0,49-0,50). La batteria agli ioni di litio di tipo B richiede una massa minima per soddisfare le esigenze del ciclo di 4267 Kg che è la più elevata di tutte. Questa batteria ha un'elevata energia specifica ma bassa potenza specifica, per questo motivo la massa risulta elevata in quanto la nostra applicazione richiede più potenza che energia. A causa di tutti questi parametri, la batteria agli ioni di litio di tipo B lavora con un DoD molto basso (3-4%). La batteria agli ioni di litio di tipo C richiede

una massa minima di 674 kg e lavora con un DoD del 18-24%. I supercondensatori (ibrido e non) lavorano con un DoD molto alto( 95%) e con un efficienza superiore a quella ottenuta per le batterie agli ioni di litio. In particolare, l'efficienza del supercondensatore è superiore a quella del supercondensatore ibrido (0,88 contro lo 0,68) mentre la massa minima necessaria risulta più contenuta (1142 kg contro i 1334 kg).

## **Caso studio 2**

Nel secondo caso di studio le esigenze del ciclo sono le medesime del caso 1 (potenza di 1,28 MW e un'energia di 2,906 kWh ). Saranno modificati solo il numero dei cicli da compiere al giorno con lo scopo di vedere come cambiano i requisiti che il sistema di accumulo deve avere e i costi richiesti per soddisfare le diverse esigenze.

Osservando l'equazione dei costi d'impianto, si può notare che questi dipendono dal numero delle sostituzioni. Questo numero viene ricavato andando a prendere la parte intera del risultato della divisione del numero dei cicli totali durante la vita dell'impianto con il numero dei cicli che una singola batteria può sostenere (dal numero delle sostituzioni poi bisogna sommare la batteria iniziale con la quale si riesce a coprire tutti i cicli). I costi di esercizio invece sono direttamente proporzionali al numero dei cicli totali. In generale, quindi, si vedrà che, andando ad aumentare il numero dei cicli, i costi totali aumenteranno.

## BATTERIA AGLI IONI DI LITIO LTO - TIPO A

### 4 CICLI AL GIORNO PER 20 ANNI PER UN TOTALE DI 29200 CICLI

N° ITERAZIONE	0	1	2	3
COSTO DEL CAPITALE [Euro]	35064,09147	35138,06635	35212,04	35286,02
COSTO DI ESERCIZIO [Euro]	7186,761863	7175,898872	7165,135	7154,466
POTENZA SPECIFICA DISPONIBILE [W/Kg]	2700,421941	2694,736842	2689,076	2683,438
ENERGIA SPECIFICA DISPONIBILE [Wh/Kg]	9,225613005	9,282933015	9,340119	9,397172
EFFICIENZA	0,496377782	0,497139021	0,497893	0,498641
DoD-DEPTH OF DISCHARGE %	66,45413898	65,90476013	65,36364	64,8306
NUMERO DI SOSTITUZIONI	4	4	4	4
DURATA VITALE IN ANNI	4	4	4	4
NUMERO DI CICLI DI VITA	6877	6992	7110	7230
MASSA [Kg]	474	475	476	477
COSTO TOTALE [Euro]	42250,85333	42313,96522	42377,18	42440,48
COSTO TOTALE PER CICLO [Euro/Wh]	0,000497917	0,000498661	0,000499	0,0005

4	5	14	15	16	21	25	26	33	34
28552,32	28612,05	29149,65	28463,64	28521,84	28812,88	22572,59	22617,83	22934,48	22590,23
7143,892	7133,41	7042,835	7033,154	7023,542	6976,48	6939,931	6930,935	6869,408	6860,812
2677,824	2672,234	2622,951	2617,587	2612,245	2585,859	2565,13	2560	2524,655	2519,685
9,454092	9,51088	10,01606	10,07154	10,1269	10,40174	10,61935	10,67343	11,04857	11,10167
0,499382	0,500117	0,506464	0,507142	0,507816	0,511114	0,513675	0,514305	0,518617	0,519219
64,30546	63,78806	59,45369	59,00526	58,56298	56,43964	54,83998	54,45296	51,8778	51,52803
3	3	3	3	3	3	2	2	2	2
5	5	5	6	6	6	7	7	7	8
7352	7476	8672	8814	8956	9692	10304	10461	11584	11748
478	479	488	489	490	495	499	500	507	508
35696,21	35745,46	36192,48	35496,79	35545,39	35789,36	29512,52	29548,76	29803,89	29451,04
0,000421	0,000421	0,000427	0,000418	0,000419	0,000422	0,000348	0,000348	0,000351	0,000347

35	42	43	44	50	51	52
22634,7	22945,98	22606,09	22649,81	22912,17	16418,97	16450,25
6852,26	6793,578	6785,352	6777,164	6728,77	6720,82	6712,902
2514,735	2480,62	2475,822	2471,042	2442,748	2438,095	2433,46
11,15465	11,52211	11,57412	11,62602	11,93493	11,986	12,03696
0,519818	0,523931	0,524507	0,525081	0,528472	0,529029	0,529584
51,18255	48,87805	48,56427	48,25416	46,46699	46,18085	45,89792
2	2	2	2	2	1	1
8	8	9	9	9	10	10
11913	13094	13266	13438	14486	14663	14840
509	516	517	518	524	525	526
29486,96	29739,56	29391,44	29426,98	29640,94	23139,79	23163,15
0,000347	0,00035	0,000346	0,000347	0,000349	0,000273	0,000273

58	59	60	66	67	68	74	75
16637,89	16528,03	16559,04	16745,1	16635,54	16666,29	16850,78	16741,55
6666,017	6658,302	6650,614	6605,02	6597,507	6590,016	6545,539	6538,2
2406,015	2401,501	2397,004	2370,37	2365,989	2361,624	2335,766	2331,512
12,3403	12,39045	12,4405	12,73839	12,78765	12,8368	13,12938	13,17776
0,53287	0,53341	0,533949	0,537144	0,537671	0,538196	0,541312	0,541827
44,26478	44,00289	43,74381	42,24616	42,00564	41,76761	40,38973	40,16814
1	1	1	1	1	1	1	1
10	11	11	11	12	12	12	13
15912	16093	16273	17364	17547	17730	18832	19016
532	533	534	540	541	542	548	549
23303,91	23186,34	23209,66	23350,12	23233,04	23256,3	23396,32	23279,75
0,000275	0,000273	0,000274	0,000275	0,000274	0,000274	0,000276	0,000274

76	82	83	84	90	91	98	99
16772,04	16955,01	16846,13	16876,38	17057,84	16949,36	17159,35	17051,28
6530,882	6487,38	6480,196	6473,029	6430,39	6423,342	6374,445	6367,52
2327,273	2302,158	2298,025	2293,907	2269,504	2265,487	2237,762	2233,857
13,22603	13,51341	13,56094	13,60836	13,89067	13,93735	14,26129	14,30716
0,542339	0,545388	0,545891	0,546394	0,549382	0,549875	0,553302	0,553787
39,94877	38,67726	38,47252	38,26976	37,09312	36,90344	35,62384	35,44765
1	1	1	1	1	1	1	1
13	13	14	14	14	15	15	16
19201	20310	20495	20680	21791	21976	23269	23454
550	556	557	558	564	565	572	573
23302,92	23442,39	23326,33	23349,41	23488,23	23372,7	23533,8	23418,8
0,000275	0,000276	0,000275	0,000275	0,000277	0,000275	0,000277	0,000276



100	106	107	108	114	115	116	122
17081,04	17259,59	17151,97	17181,49	17358,62	17251,48	17280,77	17456,51
6360,61	6319,445	6312,632	6305,833	6265,311	6258,602	6251,905	6211,98
2229,965	2206,897	2203,098	2199,313	2176,871	2173,175	2169,492	2147,651
14,35293	14,62544	14,67051	14,71549	14,98327	15,02756	15,07175	15,33491
0,554272	0,557156	0,557634	0,55811	0,56095	0,56142	0,561889	0,564687
35,27306	34,25773	34,0937	33,93111	32,98464	32,83159	32,67984	31,79568
1	1	1	1	1	1	1	1
16	16	17	17	17	18	18	18
23638	24742	24925	25108	26204	26386	26567	27653
574	580	581	582	588	589	590	596
23441,65	23579,03	23464,6	23487,33	23623,93	23510,08	23532,67	23668,49
0,000276	0,000278	0,000277	0,000277	0,000278	0,000277	0,000277	0,000279

123	130	131	132
17349,86	17553,3	10350,34	10367,45
6205,367	6159,401	6152,879	6146,369
2144,054	2119,205	2115,702	2112,211
15,37844	15,68052	15,7233	15,76599
0,56515	0,568372	0,568829	0,569285
31,65257	30,68303	30,54896	30,41597
1	1	0	0
19	19	20	20
27833	29085	29263	29441
597	604	605	606
23555,23	23712,7	16503,22	16513,82
0,000278	0,000279	0,000194	0,000195

Il grafico sottostante rappresenta l'andamento dei costi totali per una batteria agli ioni di litio LTO tipo A. Tale andamento è ricorrente anche negli altri casi successivi ed è costituito da una successione di gradini. Ogni volta che il numero delle sostituzioni diminuisce, ho un gradino più basso rispetto al precedente. Nelle tabelle delle situazioni successive saranno riportate quelle iterazioni che concorrono a determinare tale andamento.

Fig 5.24 – Costi di impianto batteria ioni di litio LTO compiendo 4 cicli al giorno

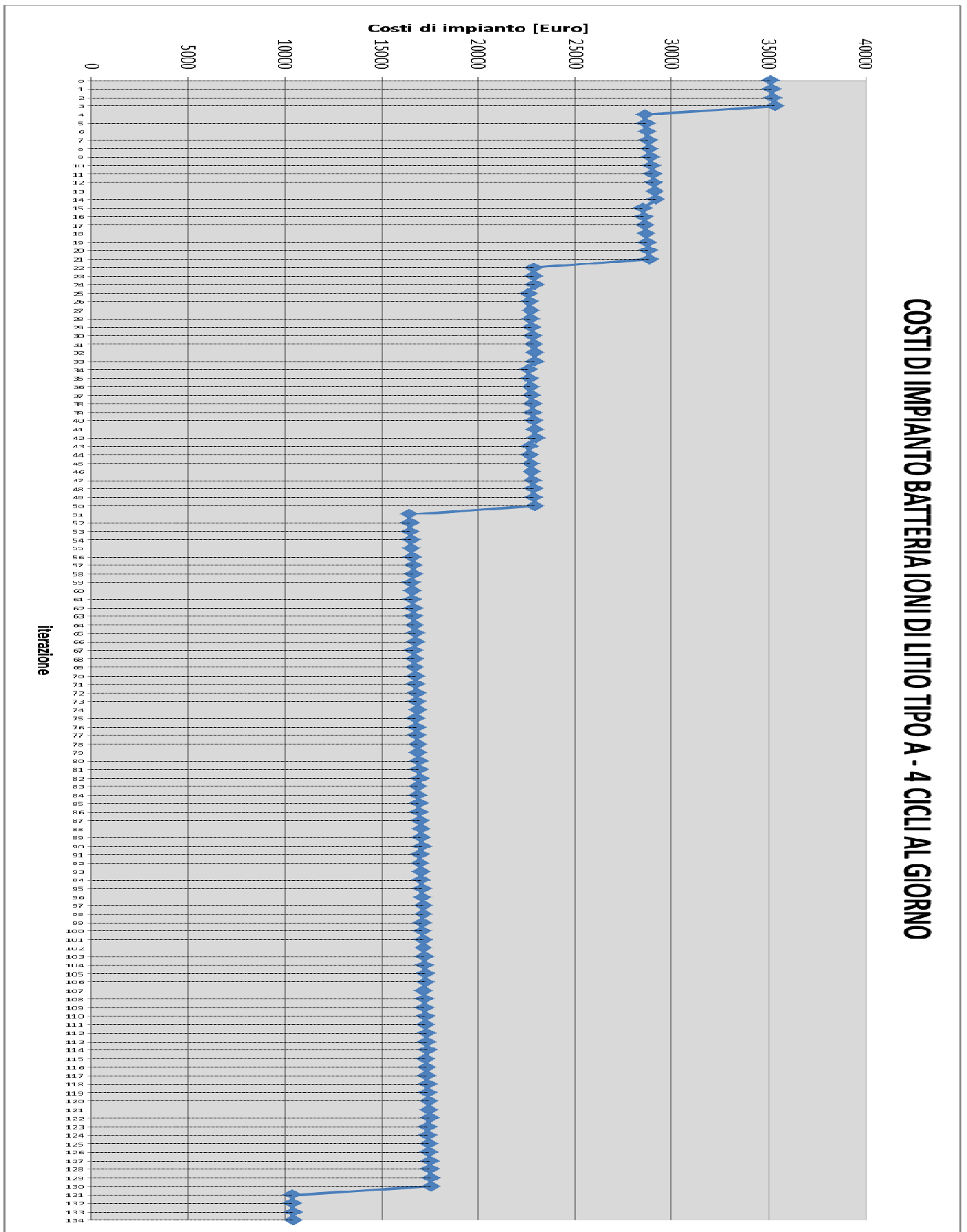


Fig 5.25 – Costi di esercizio batteria ioni di litio LTO compiendo 4 cicli al giorno

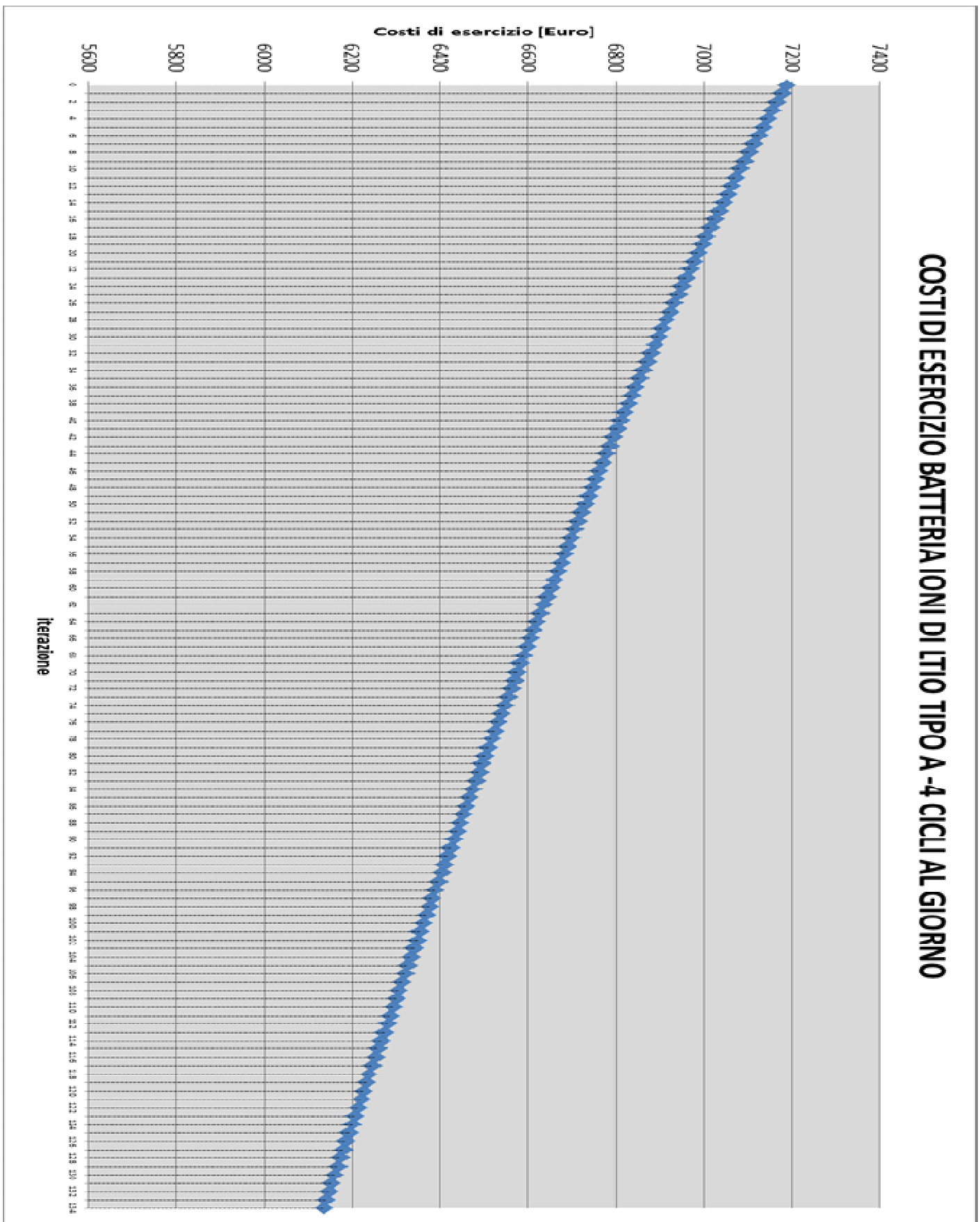


Fig 5.26 – Costi totali batteria ioni di litio LTO compiendo 4 cicli al giorno

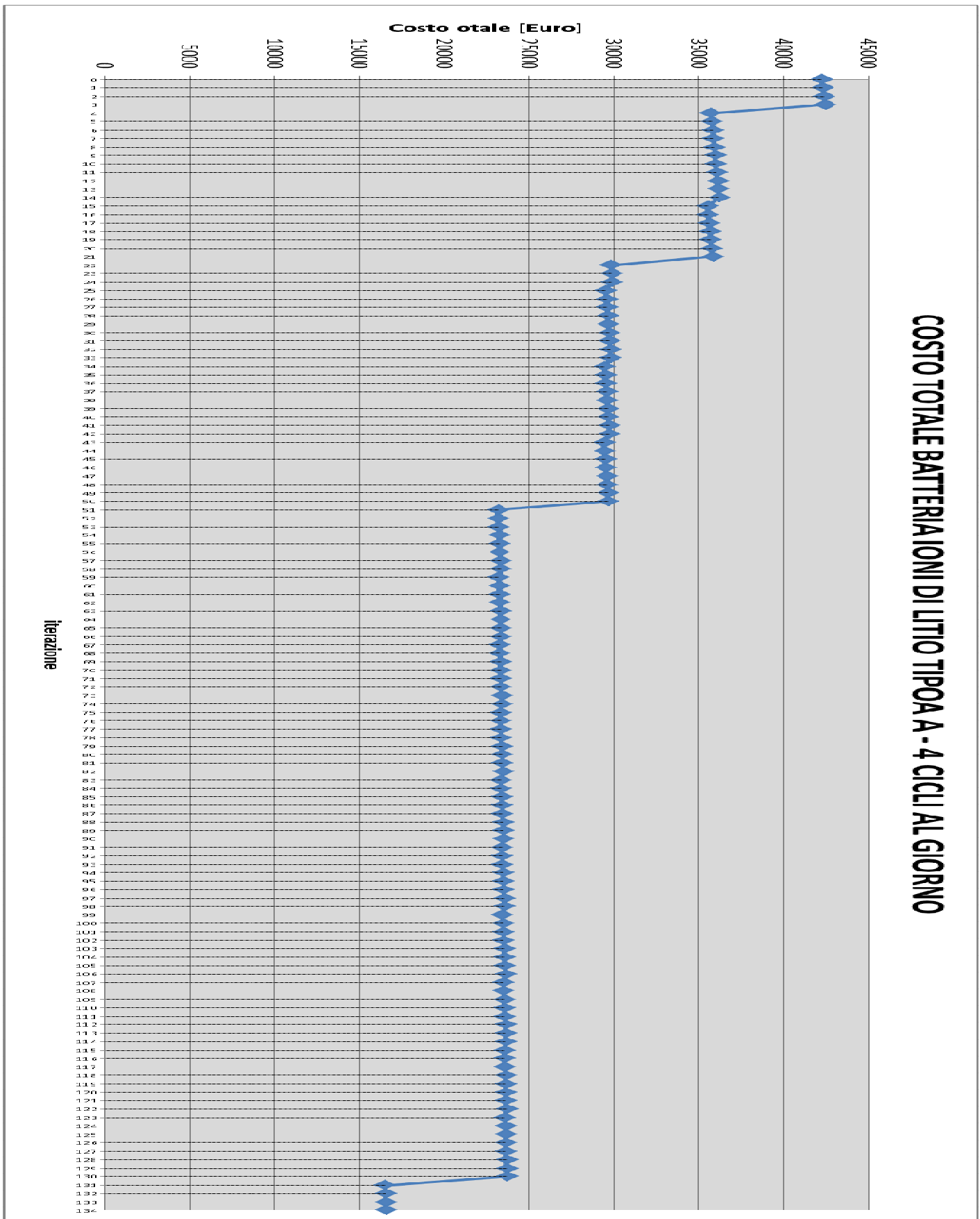
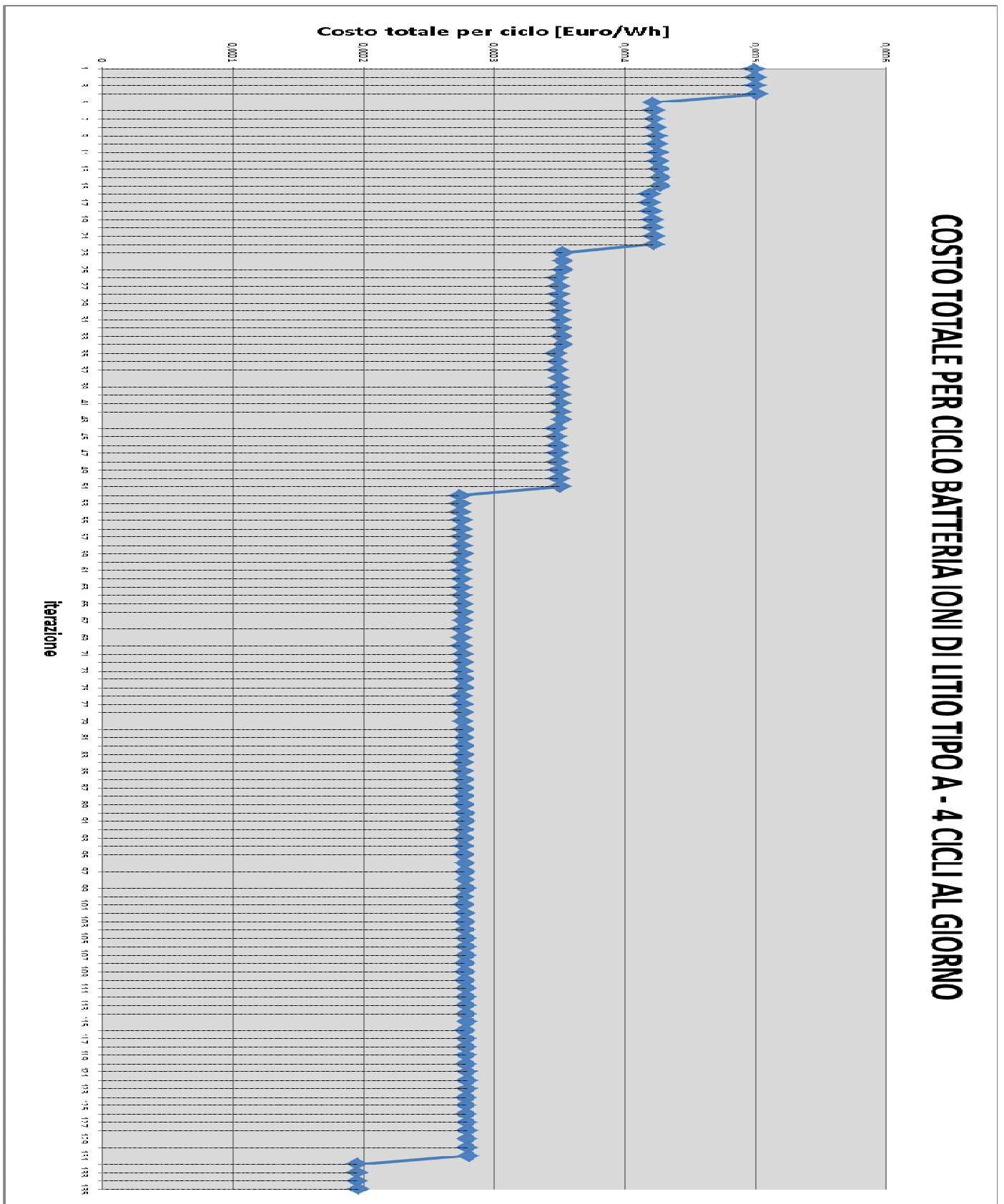


Fig 5.27 – Costi totali batteria ioni di litio LTO compiendo 4 cicli al giorno



## 6 CICLI AL GIORNO PER 20 ANNI PER UN TOTALE DI 43800 CICLI

N° ITERAZIONE	0	1	2	3
COSTO DEL CAPITALE [Euro]	48206,40247	48308,10374	48409,81	48511,51
COSTO DI ESERCIZIO [Euro]	10780,14279	10763,84831	10747,7	10731,7
POTENZA SPECIFICA DIPSONIBILE [W/Kg]	2700,421941	2694,736842	2689,076	2683,438
ENERGIA SPECIFICA DISPONIBILE [Wh/Kg]	9,225613005	9,282933015	9,340119	9,397172
EFFICIENZA	0,496377782	0,497139021	0,497893	0,498641
DoD-DEPTH OF DISCHARGE %	66,45413898	65,90476013	65,36364	64,8306
NUMERO DI SOSTITUZIONI	6	6	6	6
DURATA VITALE IN ANNI	3	3	3	3
NUMERO DI CICLI DI VITA	6877	6992	7110	7230
MASSA [Kg]	474	475	476	477
COSTO TOTALE [Euro]	58986,54527	59071,95205	59157,51	59243,21
COSTO TOTALE PER CICLO [Euro/Wh]	0,000463429	0,0004641	0,000465	0,000465

4	5	14	15	16	29	30	31	42	43
42790,48	42880	43685,68	36173,71	36247,69	37209,36	30105,37	30165,11	30822,17	30093,46
10715,84	10700,11	10564,25	10549,73	10535,31	10356,4	10343,22	10330,11	10190,37	10178,03
2677,824	2672,234	2622,951	2617,587	2612,245	2544,732	2539,683	2534,653	2480,62	2475,822
9,454092	9,51088	10,01606	10,07154	10,1269	10,83495	10,88854	10,942	11,52211	11,57412
0,499382	0,500117	0,506464	0,507142	0,507816	0,516174	0,51679	0,517402	0,523931	0,524507
64,30546	63,78806	59,45369	59,00526	58,56298	53,32131	52,9536	52,5905	48,87805	48,56427
5	5	5	4	4	4	3	3	3	3
3	3	3	4	4	4	5	5	5	6
7352	7476	8672	8814	8956	10936	11096	11258	13094	13266
478	479	488	489	490	503	504	505	516	517
53506,32	53580,11	54249,93	46723,44	46783	47565,76	40448,59	40495,22	41012,54	40271,48
0,00042	0,000421	0,000426	0,000367	0,000368	0,000374	0,000318	0,000318	0,000322	0,000316

50	55	56	66	67	78
30500,91	23929,66	23974,9	24427,25	24057,7	24546,86
10093,16	10033,99	10022,3	9907,53	9896,26	9774,457
2442,748	2419,66	2415,094	2370,37	2365,989	2318,841
11,93493	12,18915	12,23964	12,73839	12,78765	13,32225
0,528472	0,531236	0,531783	0,537144	0,537671	0,543361
46,46699	45,06783	44,79721	42,24616	42,00564	39,51653
3	2	2	2	2	2
6	7	7	7	8	8
14486	15374	15553	17364	17547	19570
524	529	530	540	541	552
40594,07	33963,66	33997,19	34334,79	33953,96	34321,32
0,000319	0,000267	0,000267	0,00027	0,000267	0,00027

79	80	90	91	92	102	103	104	114	115
24180,21	24223,93	24661,19	17669,94	17701,22	18013,96	17892,45	17923,46	18233,55	18111,52
9763,568	9752,707	9645,585	9635,013	9624,465	9520,248	9509,947	9499,666	9397,966	9387,902
2314,647	2310,469	2269,504	2265,487	2261,484	2222,222	2218,371	2214,533	2176,871	2173,175
13,3702	13,41805	13,89067	13,93735	13,98394	14,44417	14,48963	14,535	14,98327	15,02756
0,54387	0,544377	0,549382	0,549875	0,550368	0,555237	0,555718	0,556199	0,56095	0,56142
39,30361	39,09278	37,09312	36,90344	36,71552	34,92856	34,75861	34,59017	32,98464	32,83159
2	2	2	1	1	1	1	1	1	1
9	9	9	10	10	10	11	11	11	12
19755	19940	21791	21976	22161	24007	24191	24374	26204	26386
553	554	564	565	566	576	577	578	588	589
33943,77	33976,64	34306,77	27304,96	27325,68	27534,21	27402,4	27423,13	27631,52	27499,42
0,000267	0,000267	0,00027	0,000215	0,000215	0,000216	0,000215	0,000215	0,000217	0,000216

116	126	127	138	139	140	151	152	153	164
18142,27	18449,76	18327,27	18662,71	18539,82	18570,06	18902,75	18779,29	18809,29	19139,28
9377,857	9278,398	9268,549	9161,301	9151,648	9142,011	9037,031	9027,579	9018,141	8915,301
2169,492	2133,333	2129,784	2091,503	2088,091	2084,691	2048	2044,728	2041,467	2006,27
15,07175	15,50846	15,55161	16,02023	16,06229	16,10425	16,56003	16,60094	16,64176	17,08518
0,561889	0,566536	0,566996	0,572006	0,572457	0,572907	0,577812	0,578253	0,578694	0,583499
32,67984	31,23026	31,09178	29,63981	29,51398	29,38913	28,07724	27,96331	27,85023	26,65971
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
12	12	13	13	14	14	14	15	15	15
26567	28371	28550	30499	30675	30850	32754	32925	33096	34950
590	600	601	612	613	614	625	626	627	638
27520,12	27728,16	27595,82	27824,01	27691,47	27712,08	27939,78	27806,87	27827,43	28054,58
0,000216	0,000218	0,000217	0,000219	0,000218	0,000218	0,00022	0,000218	0,000219	0,00022

165	166	177	178	179	191	192	193
19015,31	19045,07	19372,4	19248	19277,52	19631,78	19506,77	19536,06
8906,039	8896,791	8796	8786,921	8777,856	8670,149	8661,262	8652,388
2003,13	2000	1966,206	1963,19	1960,184	1924,812	1921,922	1919,04
17,12499	17,16471	17,59622	17,63496	17,67362	18,13138	18,16902	18,20658
0,583931	0,584363	0,589072	0,589496	0,58992	0,594952	0,595367	0,595781
26,55611	26,45326	25,36853	25,27397	25,18007	24,10144	24,0154	23,92993
1	1	1	1	1	1	1	1
16	16	16	17	17	17	18	18
35117	35283	37084	37246	37407	39309	39465	39621
639	640	651	652	653	665	666	667
27921,35	27941,86	28168,4	28034,92	28055,37	28301,92	28168,03	28188,44
0,000219	0,00022	0,000221	0,00022	0,00022	0,000222	0,000221	0,000221

206	207	208	219	220	221	222
19916,82	19791,05	19820,11	20139,79	20168,85	11890,06	11907,17
8538,253	8529,566	8520,893	8426,357	8417,841	8409,339	8400,849
1882,353	1879,589	1876,833	1847,042	1844,38	1841,727	1839,08
18,68798	18,72448	18,76092	19,15686	19,19242	19,22791	19,26333
0,601113	0,601519	0,601924	0,606341	0,606739	0,607136	0,607533
22,8678	22,7897	22,7121	21,88961	21,81757	21,74596	21,67479
1	1	1	1	1	0	0
18	19	19	19	19	20	20
41609	41759	41908	43530	43675	43819	43964
680	681	682	693	694	695	696
28455,07	28320,62	28341,01	28566,15	28586,7	20299,4	20308,02
0,000224	0,000223	0,000223	0,000224	0,000225	0,000159	0,00016



Fig 5.28 – Costi di impianto batteria ioni di litio tipo A compiendo 6 cicli al giorno

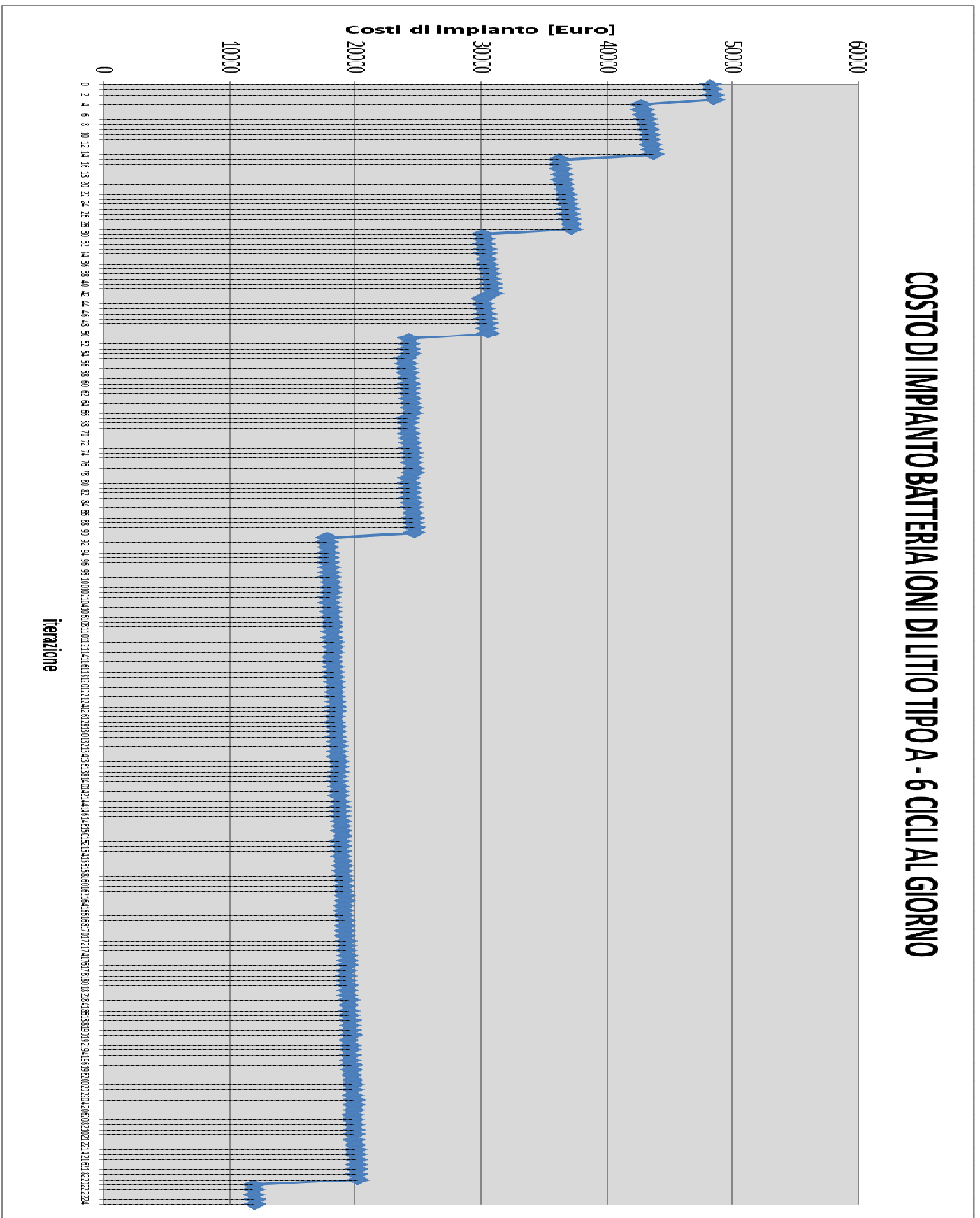


Fig 5.29 – Costi di esercizio batteria ioni di litio tipo A compiendo 6 cicli al giorno

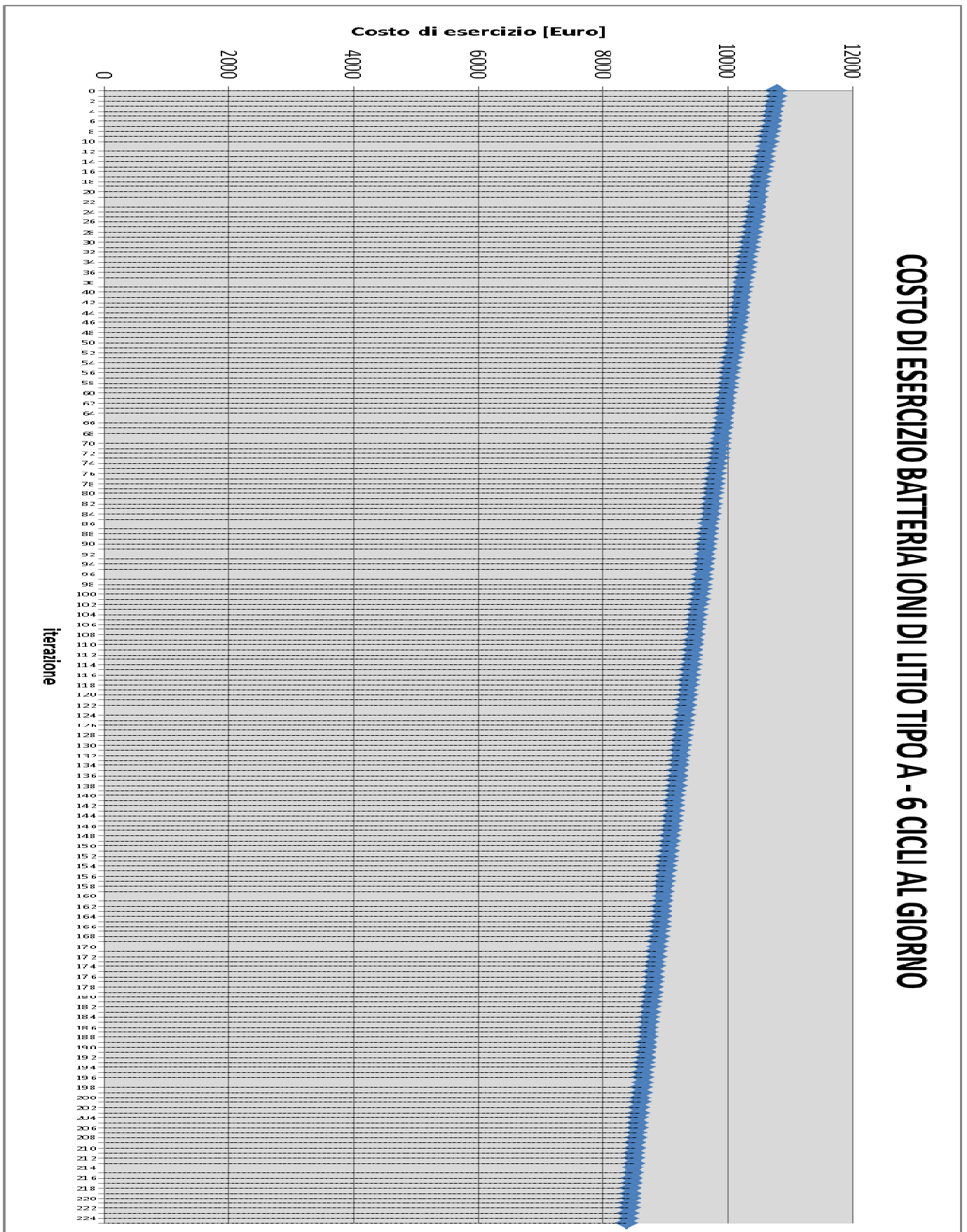
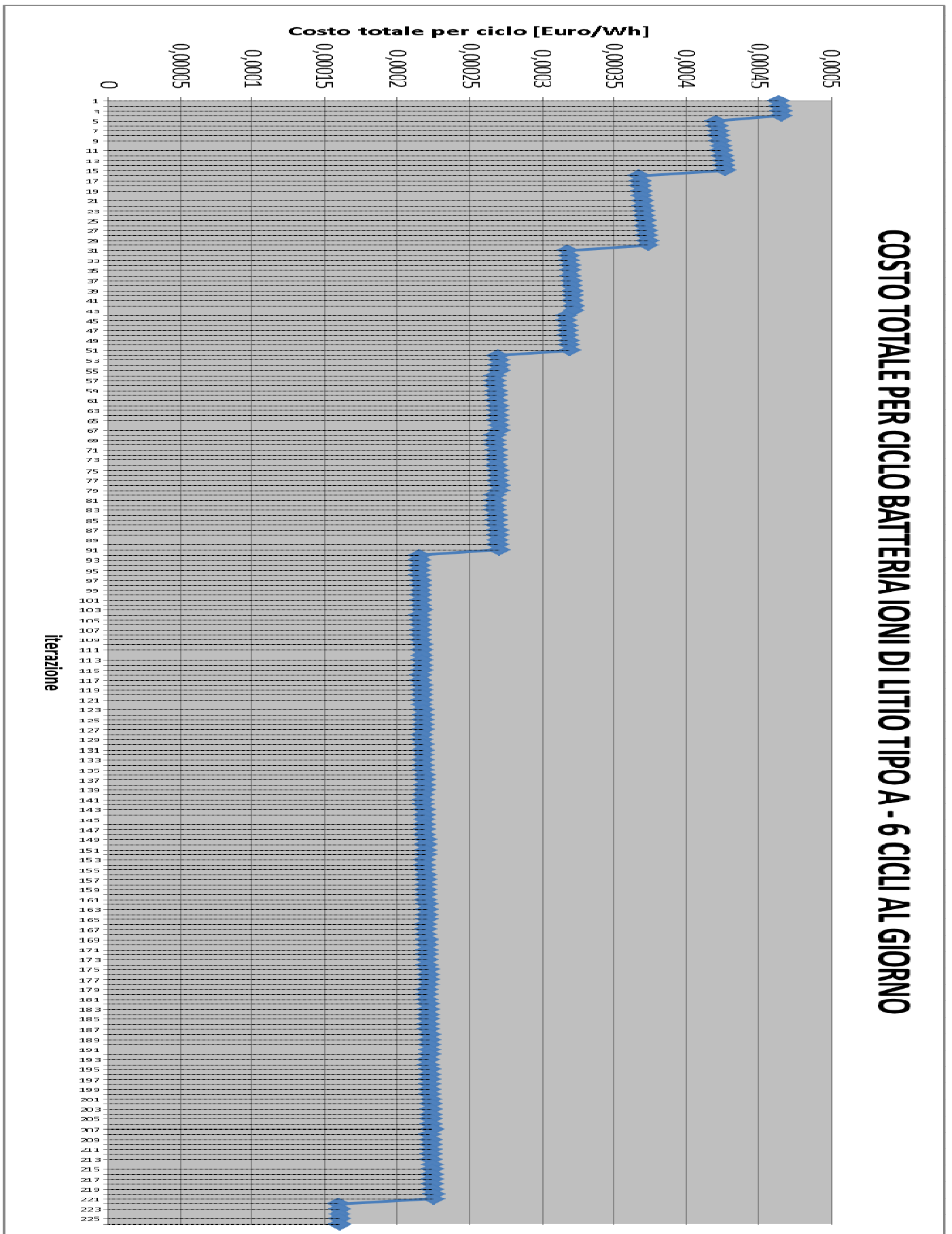




Fig 5.31 – Costi totali per ciclo batteria ioni-litio tipo A compiendo 6 cicli al giorno



## 8 CICLI AL GIORNO PER 20 ANNI PER UN TOTALE DI 58400 CICLI

N° ITERAZIONE	0	1	2	3
COSTO DEL CAPITALE [Euro]	63055,62381	63188,65255	63321,68	63454,71
COSTO DI ESERCIZIO [Euro]	14373,52373	14351,79774	14330,27	14308,93
POTENZA SPECIFICA DISPONIBILE [W/Kg]	2700,421941	2694,736842	2689,076	2683,438
ENERGIA SPECIFICA DISPONIBILE [Wh/Kg]	9,225613005	9,282933015	9,340119	9,397172
EFFICIENZA	0,496377782	0,497139021	0,497893	0,498641
DoD-DEPTH OF DISCHARGE %	66,45413898	65,90476013	65,36364	64,8306
NUMERO DI SOSTITUZIONI	8	8	8	8
DURATA VITALE IN ANNI	2	2	2	2
NUMERO DI CICLI DI VITA	6877	6992	7110	7230
MASSA [Kg]	474	475	476	477
COSTO TOTALE [Euro]	77429,14753	77540,45029	77651,95	77763,64
COSTO TOTALE PER CICLO [Euro/Wh]	0,000456243	0,000456899	0,000458	0,000458

4	5	15	16	22	23	33	34	35	50
57541,08	57661,46	49731,92	49833,62	44401,84	44491,36	45386,55	37579,24	37653,21	38762,84
14287,78	14266,82	14066,31	14047,08	13934,51	13916,18	13738,82	13721,62	13704,52	13457,54
2677,824	2672,234	2617,587	2612,245	2580,645	2575,453	2524,655	2519,685	2514,735	2442,748
9,454092	9,51088	10,07154	10,1269	10,45633	10,5108	11,04857	11,10167	11,15465	11,93493
0,499382	0,500117	0,507142	0,507816	0,51176	0,512402	0,518617	0,519219	0,519818	0,528472
64,30546	63,78806	59,00526	58,56298	56,03179	55,6293	51,8778	51,52803	51,18255	46,46699
7	7	6	6	5	5	5	4	4	4
2	2	3	3	3	3	3	4	4	4
7352	7476	8814	8956	9843	9996	11584	11748	11913	14486
478	479	489	490	496	497	507	508	509	524
71828,86	71928,28	63798,23	63880,71	58336,35	58407,54	59125,37	51300,86	51357,73	52220,38
0,000423	0,000424	0,000376	0,000376	0,000344	0,000344	0,000348	0,000302	0,000303	0,000308

51	52	66	67	68	77	78	79	82	83
31359,77	31419,5	32255,76	31490,44	31548,65	32072,52	25406,58	25452,6	25590,68	25196,26
13441,64	13425,8	13210,04	13195,01	13180,03	13047,17	13032,61	13018,09	12974,76	12960,39
2438,095	2433,46	2370,37	2365,989	2361,624	2323,049	2318,841	2314,647	2302,158	2298,025
11,986	12,03696	12,73839	12,78765	12,8368	13,2742	13,32225	13,3702	13,51341	13,56094
0,529029	0,529584	0,537144	0,537671	0,538196	0,542851	0,543361	0,54387	0,545388	0,545891
46,18085	45,89792	42,24616	42,00564	41,76761	39,73158	39,51653	39,30361	38,67726	38,47252
3	3	3	3	3	3	2	2	2	2
5	5	5	6	6	6	6	6	6	7
14663	14840	17364	17547	17730	19385	19570	19755	20310	20495
525	526	540	541	542	551	552	553	556	557
44801,41	44845,3	45465,8	44685,46	44728,68	45119,69	38439,19	38470,69	38565,44	38156,65
0,000264	0,000264	0,000268	0,000263	0,000264	0,000266	0,000226	0,000227	0,000227	0,000225

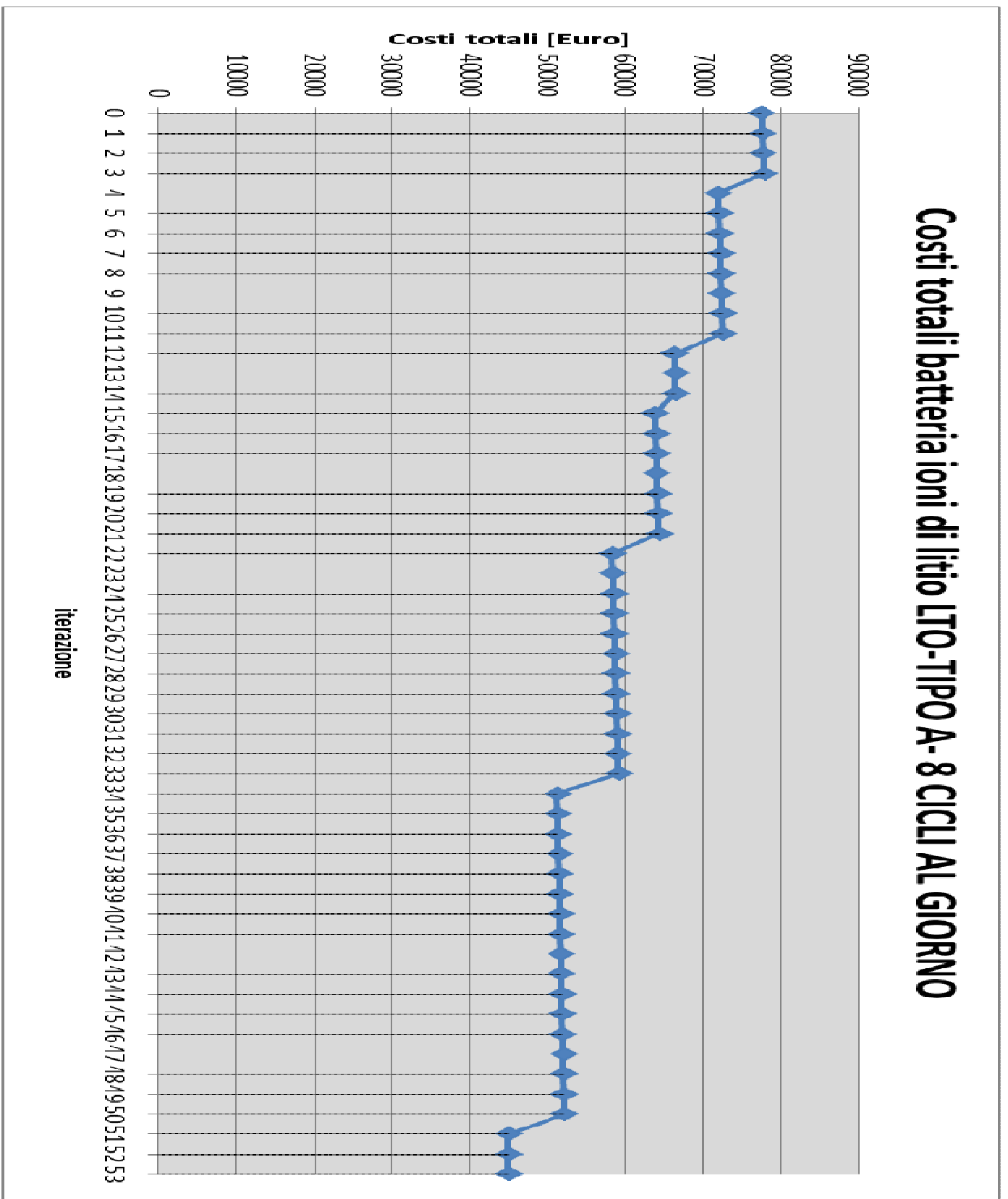
84	98	99	100	114	115	116	130	131	132
25241,5	25874,8	25480,71	25525,18	26147,75	25754,32	25798,05	26410,21	18920,91	18952,19
12946,06	12748,89	12735,04	12721,22	12530,62	12517,2	12503,81	12318,8	12305,76	12292,74
2293,907	2237,762	2233,857	2229,965	2176,871	2173,175	2169,492	2119,205	2115,702	2112,211
13,60836	14,26129	14,30716	14,35293	14,98327	15,02756	15,07175	15,68052	15,7233	15,76599
0,546394	0,553302	0,553787	0,554272	0,56095	0,56142	0,561889	0,568372	0,568829	0,569285
38,26976	35,62384	35,44765	35,27306	32,98464	32,83159	32,67984	30,68303	30,54896	30,41597
2	2	2	2	2	2	2	2	1	1
7	7	8	8	8	9	9	9	10	10
20680	23269	23454	23638	26204	26386	26567	29085	29263	29441
558	572	573	574	588	589	590	604	605	606
38187,55	38623,69	38215,75	38246,4	38678,37	38271,53	38301,86	38729,01	31226,67	31244,92
0,000225	0,000228	0,000225	0,000225	0,000228	0,000226	0,000226	0,000228	0,000184	0,000184

147	148	149	164	165	166	182	183	201	202
19421,3	19287,88	19318,88	19784,03	19649	19679,75	20171,74	20034,97	20583,87	20445,22
12099,99	12087,3	12074,64	11887,07	11874,72	11862,39	11667,66	11655,65	11442,51	11430,84
2061,192	2057,878	2054,575	2006,27	2003,13	2000	1951,22	1948,25	1896,296	1893,491
16,39553	16,43678	16,47795	17,08518	17,12499	17,16471	17,78913	17,82747	18,50433	18,54121
0,576038	0,576483	0,576926	0,583499	0,583931	0,584363	0,591186	0,591607	0,599075	0,599484
28,54162	28,42421	28,30768	26,65971	26,55611	26,45326	24,90217	24,81079	23,26582	23,1852
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	11	11	11	12	12	12	13	13	14
32067	32239	32411	34950	35117	35283	37888	38047	40852	41004
621	622	623	638	639	640	656	657	675	676
31521,29	31375,18	31393,53	31671,09	31523,72	31542,14	31839,4	31690,61	32026,38	31876,06
0,000186	0,000185	0,000185	0,000187	0,000186	0,000186	0,000188	0,000187	0,000189	0,000188

203	220	221	222	241	242	243	263	264	265
20475,46	20989,62	20849,21	20879,21	21449,19	21306,67	21336,42	69367,48	69222,74	69252,26
11419,19	11223,79	11212,45	11201,13	10989,33	10978,35	10967,4	10751,74	10741,13	10730,54
1890,694	1844,38	1841,727	1839,08	1790,21	1787,709	1785,216	1736,771	1734,417	1732,07
18,57801	19,19242	19,22791	19,26333	19,9231	19,95714	19,99111	20,65684	20,68945	20,722
0,599892	0,606739	0,607136	0,607533	0,614954	0,615338	0,615722	0,623279	0,62365	0,624021
23,10509	21,81757	21,74596	21,67479	20,40012	20,33688	20,274	19,08817	19,03226	18,97665
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
14	14	15	15	15	16	16	16	17	17
41156	43675	43819	43964	46632	46768	46905	49552	49680	49808
677	694	695	696	715	716	717	737	738	739
31894,65	32213,41	32061,66	32080,34	32438,52	32285,02	32303,82	80119,21	79963,86	79982,79
0,000188	0,00019	0,000189	0,000189	0,000191	0,00019	0,00019	0,000472	0,000471	0,000471

287	288	289	312	313	314	339	340	341	342
69901,73	69754,45	69783,74	70457,39	70307,49	70336,55	71063,1	61361,8	61378,91	61396,02
10501,69	10491,47	10481,27	10251,09	10241,27	10231,47	9991,408	9982,004	9972,614	9963,24
1681,997	1679,79	1677,588	1628,499	1626,429	1624,365	1574,416	1572,482	1570,552	1568,627
21,42248	21,45362	21,48471	22,1838	22,21352	22,24318	22,96725	22,99553	23,02375	23,05193
0,63204	0,632398	0,632755	0,64082	0,641164	0,641508	0,649919	0,650249	0,650578	0,650906
17,82548	17,77624	17,72726	16,66622	16,62278	16,57954	15,5631	15,52487	15,48681	15,44892
1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
17	18	18	18	19	19	19	20	20	20
52538	52658	52778	55442	55554	55666	58357	58461	58564	58667
761	762	763	786	787	788	813	814	815	816
80403,41	80245,92	80265,01	80708,48	80548,76	80568,02	81054,5	71343,81	71351,53	71359,26
0,000474	0,000473	0,000473	0,000476	0,000475	0,000475	0,000478	0,00042	0,00042	0,00042

Fig 5.32 – Costi totali per ciclo batteria ioni-litio tipo A compiendo 8 cicli al giorno





## 10 CICLI AL GIORNO PER 20 ANNI PER UN TOTALE DI 73000 CICLI

N° ITERAZIONE	0	1	2	3
COSTO DEL CAPITALE [Euro]	81315,00306	81486,5537	81658,1	81829,65
COSTO DI ESERCIZIO [Euro]	17966,90466	17939,74718	17912,84	17886,17
POTENZA SPECIFICA DISPONIBILE [W/Kg]	2700,421941	2694,736842	2689,076	2683,438
ENERGIA SPECIFICA DISPONIBILE [Wh/Kg]	9,225613005	9,282933015	9,340119	9,397172
EFFICIENZA	0,496377782	0,497139021	0,497893	0,498641
DoD-DEPTH OF DISCHARGE %	66,45413898	65,90476013	65,36364	64,8306
NUMERO DI SOSTITUZIONI	10	10	10	10
DURATA VITALE IN ANNI	1	1	1	1
NUMERO DI CICLI DI VITA	6877	6992	7110	7230
MASSA [Kg]	474	475	476	477
COSTO TOTALE [Euro]	99281,90771	99426,30088	99570,94	99715,82
COSTO TOTALE PER CICLO [Euro/Wh]	0,000468006	0,000468687	0,000469	0,00047

4	5	9	10	11	17	18	19	30	31
69410,47	69555,68	70136,518	64385,91	64518,94	65317,11	59226,38	59346,76	51257,44	51359,14
17859,73	17833,52	17730,876	17705,73	17680,79	17535	17511,31	17487,78	17238,7	17216,85
2677,824	2672,234	2650,1035	2644,628	2639,175	2606,925	2601,626	2596,349	2539,683	2534,653
9,454092	9,51088	9,7367111	9,792841	9,848841	10,18212	10,23722	10,29219	10,88854	10,942
0,499382	0,500117	0,5029938	0,503699	0,504398	0,508484	0,509148	0,509808	0,51679	0,517402
64,30546	63,78806	61,792561	61,31144	60,83714	58,12673	57,69638	57,27183	52,9536	52,5905
9	9	9	8	8	8	7	7	6	6
2	2	2	2	2	2	2	2	3	3
7352	7476	7990	8123	8258	9101	9246	9394	11096	11258
478	479	483	484	485	491	492	493	504	505
87270,2	87389,2	87867,394	82091,64	82199,73	82852,11	76737,69	76834,54	68496,14	68575,99
0,000411	0,000412	0,0004142	0,000387	0,000387	0,000391	0,000362	0,000362	0,000323	0,000323

36	37	38	50	51	52	70	71	72	90
51867,65	45744,63	45834,15	46908,39	38836,81	38910,79	40242,33	32554,42	32614,16	33689,35
17109,38	17088,22	17067,16	16821,93	16802,05	16782,26	16437,76	16419,2	16400,7	16075,98
2509,804	2504,892	2500	2442,748	2438,095	2433,46	2352,941	2348,624	2344,322	2269,504
11,2075	11,26024	11,31285	11,93493	11,986	12,03696	12,93476	12,98358	13,03229	13,89067
0,520415	0,521008	0,521598	0,528472	0,529029	0,529584	0,539241	0,539761	0,540279	0,549382
50,84129	50,50415	50,17108	46,46699	46,18085	45,89792	41,29888	41,06811	40,83968	37,09312
6	5	5	5	4	4	4	3	3	3
3	3	3	3	4	4	4	5	5	5
12080	12247	12415	14486	14663	14840	18096	18280	18464	21791
510	511	512	524	525	526	544	545	546	564
68977,03	62832,85	62901,32	63730,32	55638,86	55693,04	56680,09	48973,62	49014,85	49765,32
0,000325	0,000296	0,000297	0,0003	0,000262	0,000263	0,000267	0,000231	0,000231	0,000235

91	92	111	112	130	131	132	151	152
32887,43	32945,64	26462,86	26508,09	27322,34	26903,72	26948,19	27793,1	27372,17
16058,36	16040,78	15713,78	15696,92	15398,5	15382,2	15365,92	15061,72	15045,96
2265,487	2261,484	2188,034	2184,3	2119,205	2115,702	2112,211	2048	2044,728
13,93735	13,98394	14,84981	14,89439	15,68052	15,7233	15,76599	16,56003	16,60094
0,549875	0,550368	0,559534	0,560007	0,568372	0,568829	0,569285	0,577812	0,578253
36,90344	36,71552	33,45174	33,2947	30,68303	30,54896	30,41597	28,07724	27,96331
3	3	2	2	2	2	2	2	2
6	6	7	7	7	8	8	8	9
21976	22161	25657	25840	29085	29263	29441	32754	32925
565	566	585	586	604	605	606	625	626
48945,79	48986,42	42176,64	42205,01	42720,84	42285,92	42314,11	42854,82	42418,13
0,000231	0,000231	0,000199	0,000199	0,000201	0,000199	0,000199	0,000202	0,0002

153	173	174	175	196	197	198	220	221
27415,89	28290,4	20265,7	20296,98	20953,74	20807,34	20838,35	21520,56	21370,98
15030,24	14720,76	14705,53	14690,33	14376,41	14361,71	14347,04	14029,74	14015,56
2041,467	1978,362	1975,309	1972,265	1910,448	1907,601	1904,762	1844,38	1841,727
16,64176	17,44045	17,47951	17,5185	18,31881	18,35606	18,39324	19,19242	19,22791
0,578694	0,587369	0,587796	0,588222	0,597021	0,597433	0,597845	0,606739	0,607136
27,85023	25,75335	25,65614	25,5596	23,67683	23,59356	23,51083	21,81757	21,74596
2	2	1	1	1	1	1	1	1
9	9	10	10	10	11	11	11	12
33096	36434	36597	36760	40086	40240	40393	43675	43819
627	647	648	649	670	671	672	694	695
42446,13	43011,16	34971,24	34987,31	35330,15	35169,05	35185,38	35550,29	35386,54
0,0002	0,000203	0,000165	0,000165	0,000167	0,000166	0,000166	0,000168	0,000167

222	247	248	275	276	277	278	279	280
21401,73	22170,47	22017,12	22840,47	22683,3	22713,55	23560,39	23399,11	23429,11
14001,41	13654,66	13641,06	13281,92	13268,9	13255,91	12900,32	12887,91	12875,52
1839,08	1775,312	1772,853	1708,945	1706,667	1704,394	1643,132	1641,026	1638,924
19,26333	20,12635	20,15999	21,04406	21,07593	21,10773	21,97421	22,00432	22,03438
0,607533	0,617252	0,617633	0,627701	0,628065	0,62843	0,638397	0,638745	0,639092
21,67479	20,02605	19,96494	18,43675	18,38433	18,33218	16,97637	16,9314	16,88666
1	1	1	1	1	1	1	1	1
12	12	13	13	14	14	14	15	15
43964	47446	47580	51070	51194	51318	54649	54764	54877
696	721	722	749	750	751	779	780	781
35403,14	35825,12	35658,18	36122,39	35952,21	35969,46	36460,71	36287,03	36304,64
0,000167	0,000169	0,000168	0,00017	0,000169	0,00017	0,000172	0,000171	0,000171

339	340	341	342	343	344	417	418	419	463
24389,08	24222,94	24252,7	25294,23	25122,77	25152,29	26303,63	26126,18	26155,47	27444,21
12489,26	12477,5	12465,77	12066,6	12055,52	12044,46	11626,58	11616,21	11605,85	11165,97
1574,416	1572,482	1570,552	1505,882	1504,113	1502,347	1436,588	1434,978	1433,371	1366,062
22,96725	22,99553	23,02375	23,98036	24,00682	24,03324	25,02832	25,05297	25,07757	26,11986
0,649919	0,650249	0,650578	0,661767	0,662077	0,662387	0,674101	0,674391	0,674682	0,687012
15,5631	15,52487	15,48681	14,25677	14,22432	14,192	13,03125	13,00384	12,97654	11,87368
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
15	16	16	16	17	17	17	18	18	18
58357	58461	58564	62011	62105	62198	65650	65734	65818	69287
813	814	815	850	851	852	891	892	893	937
36878,34	36700,45	36718,47	37360,82	37178,29	37196,75	37930,21	37742,39	37761,32	38610,18
0,000174	0,000173	0,000173	0,000176	0,000175	0,000175	0,000179	0,000178	0,000178	0,000182

464	465	516	517
27259,92	27288,98	28771,13	16954,03
11156,33	11146,7	10675,12	10666,24
1364,606	1363,152	1292,929	1291,625
26,14267	26,16544	27,27893	27,29987
0,687282	0,687552	0,700771	0,701019
11,85067	11,82775	10,76051	10,74141
1	1	1	0
19	19	19	20
69361	69435	72976	73041
938	939	990	991
38416,25	38435,68	39446,25	27620,27
0,000181	0,000181	0,000186	0,00013

## Osservazioni:

Incrementando i cicli al giorno e confrontando le tabelle con quelle ottenute nel caso 1, si può notare come tutti i costi crescono tranne i costi per ciclo ( i cicli totali stanno al denominatore). Aumentando i cicli da compiere durante la vita dell'impianto aumenta anche il numero delle sostituzioni necessarie e con esso i costi d'impianto della batteria (come si può intuire dall'equazione 2). I costi di esercizio per inefficienza sono invece direttamente influenzati dal numero dei cicli totali (come si può vedere dall'equazione 3). Confrontando le caratteristiche della batteria, per il medesimo numero di iterazione, per i diversi casi (2,4,6..cicli al giorno) si può notare come la potenza, l' energia specifica ,il DoD, l' efficienza e il numero di cicli durante la vita della batteria rimangono sostanzialmente uguali. Il numero dei cicli durante la vita della singola batteria non cambia perché questa è legata al DoD che viene ricavata solo da parametri energetici non influenzati dal numero dei cicli totali . Questi ultimi condizionano invece la durata vitale in anni della batteria che diminuisce con il crescere dei cicli che la singola batteria deve supportare e, di conseguenza, il numero delle sostituzioni necessarie aumenta per poter coprire tutta la durata vitale dell'impianto. Compiendo due cicli al giorno e utilizzando la massa minima di 474 Kg ho la necessità di fare 2 sostituzioni per un costo totale di 24319 euro. Se prendessimo come riferimento quest'ultima situazione (il caso 1) si osserva che, adoperando la stessa massa, il numero delle sostituzioni aumenta e sono pari a 4, se voglio fare 4 cicli al giorno (per un costo di 42250 euro , + 73,7% ca), e 6 ,se voglio fare 6 cicli al giorno (per un costo di 58986 euro, + 142,5% ca). Qualora volessi eseguire 4 cicli al giorno e 2 sostituzioni avrei bisogno di una massa di 495 Kg per un costo di 35789 euro (5477,08 euro in più, + 22,5 % ca).

Nel caso volessimo eseguire 2 cicli al giorno è già noto, dal caso precedente, che per un risparmio economico dovrei utilizzare un massa di 478 kg mettendo in conto di dover fare una sostituzione. Nel caso dei 4 cicli al giorno la soluzione meno onerosa risulta quella di adoperare una massa di 525 kg per un costo di 23139 euro (iterazione 51) sempre tenendo conto di dover fare una sostituzione. In tutti gli altri casi si

osserva che la soluzione più economicamente conveniente prevede sempre di dover cambiare la batteria una volta sola: nel caso dei 6 cicli al giorno dobbiamo adoperare una massa di 565 kg per un costo totale di 27304 euro (iterazione 91), nel caso di 8 cicli al giorno dobbiamo affrontare una spesa totale di 31226 euro e utilizzare una massa di 605 kg (iterazione 131), infine, nel caso dei 10 cicli al giorno dobbiamo adoperare una massa di 648 kg per un costo totale di 34971 euro (iterazione 174).

N.B. Le percentuali sono sempre riferite ai risultati ottenuti nel caso 1 in cui devo compiere 2 cicli al giorno per 20 anni.

## BATTERIA AGLI IONI DI LITIO - TIPO B

### 4 CICLI AL GIORNO PER 20 ANNI PER UN TOTALE DI 29200 CICLI

N° ITERAZIONE	0	1
COSTO DEL CAPITALE [Euro]	114824,97	114851,88
COSTO DI ESERCIZIO [Euro]	7185,549914	7184,339211
POTENZA SPECIFICA DISPONIBILE [W/Kg]	299,9765643	299,9062793
ENERGIA SPECIFICA DISPONIBILE [Wh/Kg]	22,58890805	22,60450364
EFFICIENZA	0,496462711	0,496547553
DoD-DEPTH OF DISCHARGE %	3,014933445	3,012147427
NUMERO DI SOSTITUZIONI	0	0
DURATA VITALE IN ANNI	35	35
NUMERO DI CICLI DI VITA	52390	52397
MASSA [Kg]	4267	4268
COSTO TOTALE [Euro]	122010,5199	122036,2192
COSTO TOTALE PER CICLO [Euro/Wh]	0,001437867	0,00143817

6	10	13	17	21	26	31	32	36	39
114986,4	115094,1	115174,8	115282,4	115390,1	115524,6	115659,2	115686,1	115793,7	115874,5
7178,304	7173,498	7169,907	7165,135	7160,381	7154,466	7148,58	7147,407	7142,723	7139,222
299,5553	299,2752	299,0654	298,7862	298,5075	298,1598	297,8129	297,7437	297,4669	297,2596
22,68242	22,74468	22,79134	22,85348	22,91557	22,99308	23,07049	23,08597	23,14781	23,19415
0,49697	0,497307	0,497559	0,497893	0,498226	0,498641	0,499053	0,499136	0,499464	0,499709
2,998288	2,987284	2,979079	2,968204	2,957401	2,943998	2,930706	2,928061	2,917524	2,909666
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35	35	35	35	35	36	36	36	36	36
52431	52458	52478	52505	52532	52565	52597	52604	52630	52649
4273	4277	4280	4284	4288	4293	4298	4299	4303	4306
122164,7	122267,6	122344,7	122447,6	122550,5	122679,1	122807,8	122833,5	122936,5	123013,7
0,00144	0,001441	0,001442	0,001443	0,001444	0,001446	0,001447	0,001448	0,001449	0,00145

Fig 5.33 – Costi di impianto batteria ioni di litio tipo B compiendo 4 cicli al giorno

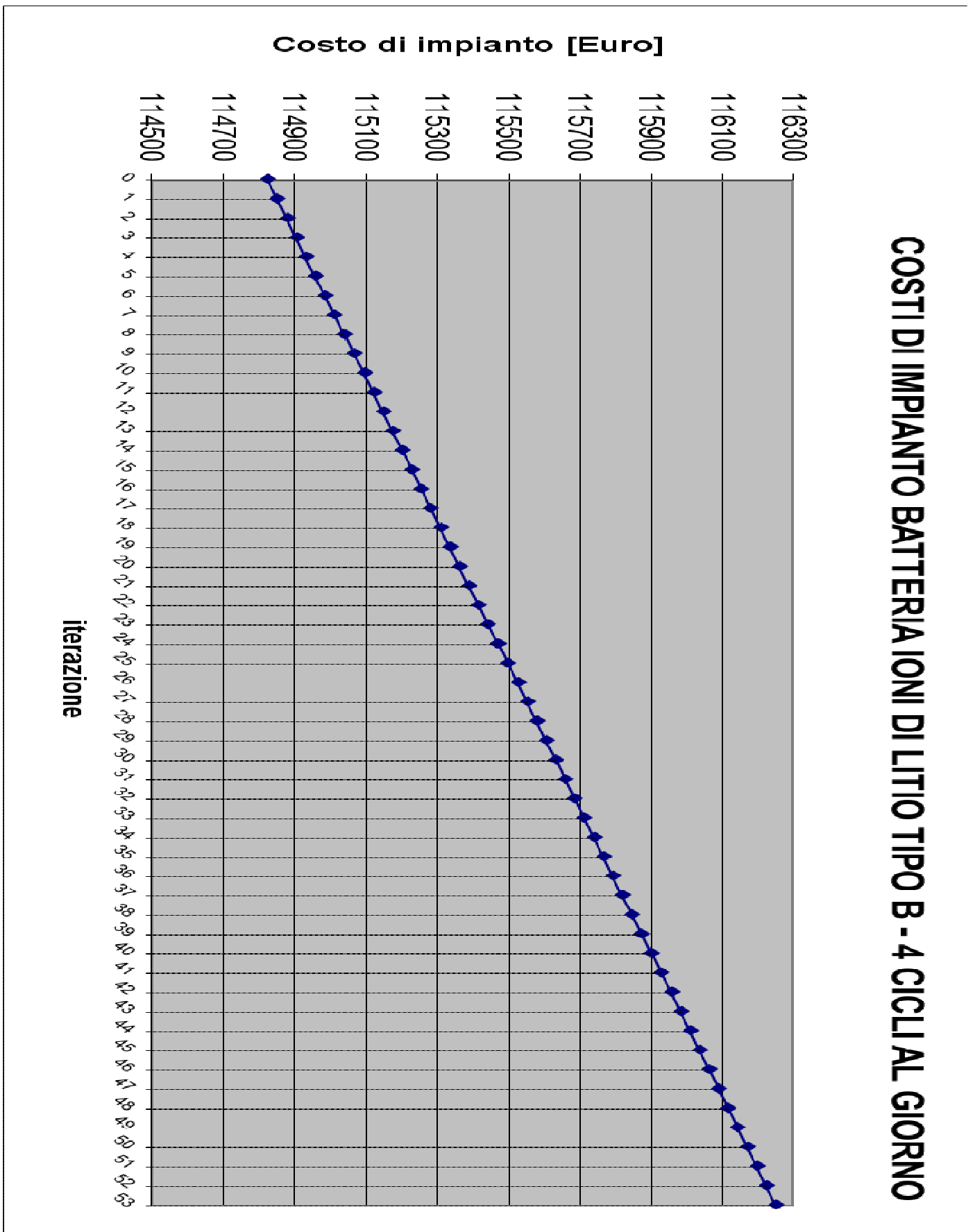


Fig 5.34 – Costi di esercizio batteria ioni di litio tipo B compiendo 4 cicli al giorno

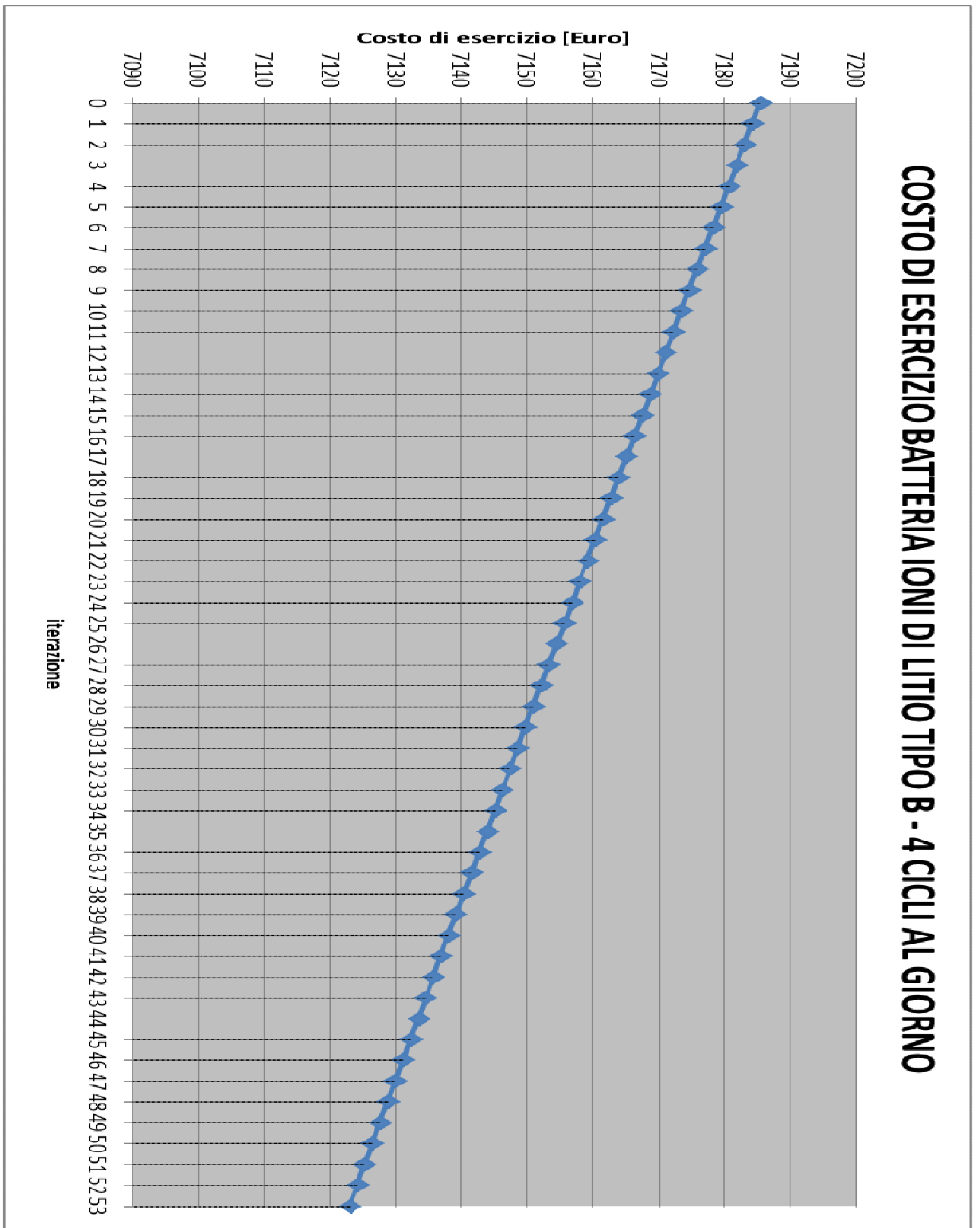




Fig 5.35 – Costi totali batteria ioni di litio tipo B compiendo 4 cicli al giorno

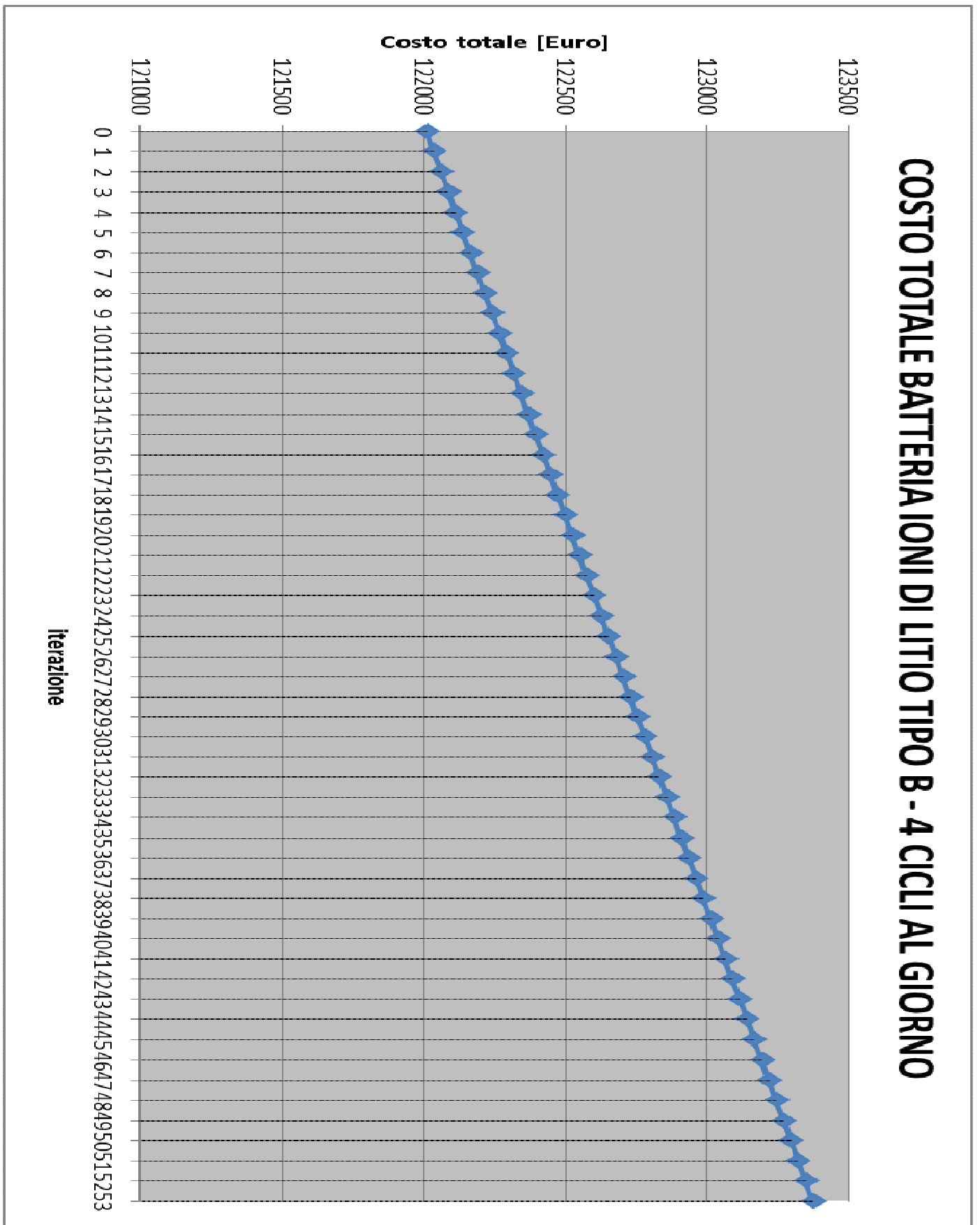
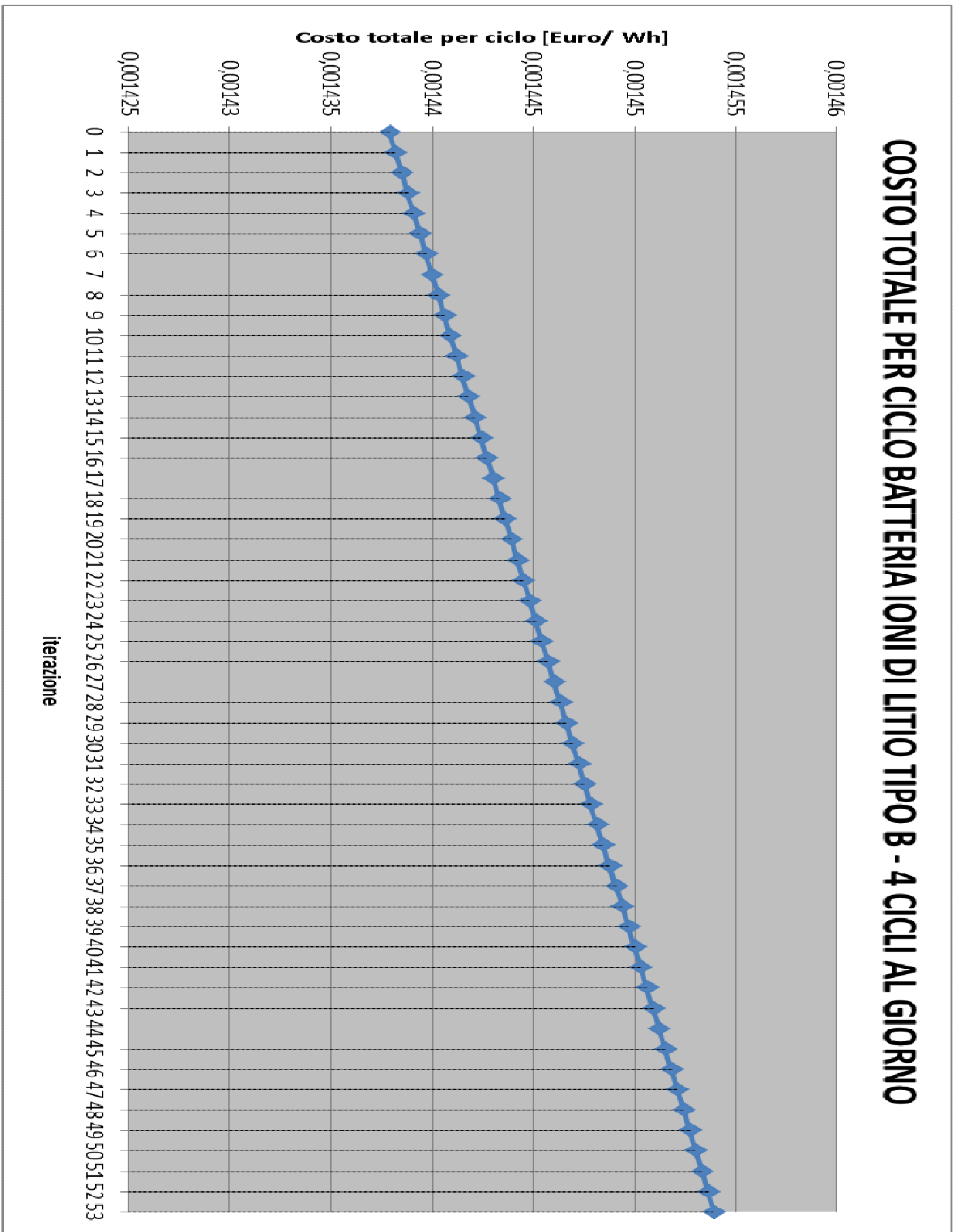


Fig 5.36 – Costi totali per ciclo batteria ioni di litio tipo B compiendo 4 cicli al giorno



## **6 CICLI AL GIORNO PER 20 ANNI PER UN TOTALE DI 43800 CICLI**

N° ITERAZIONE		0
COSTO DEL CAPITALE [Euro]		114824,97
COSTO DI ESERCIZIO [Euro]		10778,32487
POTENZA SPECIFICA DISPONIBILE [W/Kg]		299,9765643
ENERGIA SPECIFICA DISPONIBILE [Wh/Kg]		22,58890805
EFFICIENZA		0,496462711
DoD-DEPTH OF DISCHARGE %		3,014933445
NUMERO DI SOSTITUZIONI		0
DURATA VITALE IN ANNI		23
NUMERO DI CICLI DI VITA		52390
MASSA [Kg]		4267
COSTO TOTALE [Euro]		125603,2949
COSTO TOTALE PER CICLO [Euro/Wh]		0,000986805

## 8 CICLI AL GIORNO PER 20 ANNI PER UN TOTALE DI 58400 CICLI

N° ITERAZIONE	0	1	2	3
COSTO DEL CAPITALE [Euro]	198141,3139	198187,7497	198234,2	198280,6
COSTO DI ESERCIZIO [Euro]	14371,09983	14368,67842	14366,26	14363,84
POTENZA SPECIFICA DIPSONIBILE [W/Kg]	299,9765643	299,9062793	299,836	299,7658
ENERGIA SPECIFICA DISPONIBILE [Wh/Kg]	22,58890805	22,60450364	22,6201	22,63568
EFFICIENZA	0,496462711	0,496547553	0,496632	0,496717
DoD-DEPTH OF DISCHARGE %	3,014933445	3,012147427	3,009366	3,00659
NUMERO DI SOSTITUZIONI	1	1	1	1
DURATA VITALE IN ANNI	17	17	17	17
NUMERO DI CICLI DI VITA	52390	52397	52404	52411
MASSA [Kg]	4267	4268	4269	4270
COSTO TOTALE [Euro]	212512,4138	212556,4281	212600,4	212644,5
COSTO TOTALE PER CICLO [Euro/Wh]	0,001252206	0,001252466	0,001253	0,001253

4	5	6	10	13	17	21	25	26	27
198327,1	198373,5	198419,9	198605,7	198745	198930,7	199116,5	199302,2	197781,8	197827,9
14361,43	14359,02	14356,61	14347	14339,81	14330,27	14320,76	14311,29	14308,93	14306,57
299,6956	299,6255	299,5553	299,2752	299,0654	298,7862	298,5075	298,2293	298,1598	298,0904
22,65127	22,66685	22,68242	22,74468	22,79134	22,85348	22,91557	22,97759	22,99308	23,00857
0,496802	0,496886	0,49697	0,497307	0,497559	0,497893	0,498226	0,498558	0,498641	0,498724
3,003818	3,00105	2,998288	2,987284	2,979079	2,968204	2,957401	2,94667	2,943998	2,941331
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
17	17	17	17	17	17	17	17	18	18
52418	52425	52431	52458	52478	52505	52532	52558	52565	52571
4271	4272	4273	4277	4280	4284	4288	4292	4293	4294
212688,5	212732,5	212776,5	212952,7	213084,8	213261	213437,2	213613,5	212090,8	212134,5
0,001253	0,001254	0,001254	0,001255	0,001256	0,001257	0,001258	0,001259	0,00125	0,00125

31	32	53	3110	3111	3116	3117
198012,2	198058,3	199025,8	337222,1	337267,8	334901,6	198703,4
14297,16	14294,81	14246,03	9928,995	9927,96	9922,79	9921,756
297,8129	297,7437	296,2963	173,5123	173,4888	173,3713	173,3478
23,07049	23,08597	23,40993	56,65537	56,66297	56,70096	56,70855
0,499053	0,499136	0,500845	0,652106	0,652142	0,652323	0,65236
2,930706	2,928061	2,873504	0,695304	0,695116	0,69418	0,693993
1	1	1	1	1	1	0
18	18	18	19	19	19	20
52597	52604	52738	58397	58397	58400	58400
4298	4299	4320	7377	7378	7383	7384
212309,4	212353,1	213271,8	347151,1	347195,7	344824,4	208625,2
0,001251	0,001251	0,001257	0,002046	0,002046	0,002032	0,001229

# 10 CICLI AL GIORNO PER 20 ANNI PER UN TOTALE DI 73000 CICLI

N° ITERAZIONE	0	1	2	3
COSTO DEL CAPITALE [Euro]	202993,5081	203041,081	203088,7	203136,2
COSTO DI ESERCIZIO [Euro]	17963,87478	17960,84803	17957,82	17954,8
POTENZA SPECIFICA DISPONIBILE [W/Kg]	299,9765643	299,9062793	299,836	299,7658
ENERGIA SPECIFICA DISPONIBILE [Wh/Kg]	22,58890805	22,60450364	22,6201	22,63568
EFFICIENZA	0,496462711	0,496547553	0,496632	0,496717
DoD-DEPTH OF DISCHARGE %	3,014933445	3,012147427	3,009366	3,00659
NUMERO DI SOSTITUZIONI	1	1	1	1
DURATA VITALE IN ANNI	14	14	14	14
NUMERO DI CICLI DI VITA	52390	52397	52404	52411
MASSA [Kg]	4267	4268	4269	4270
COSTO TOTALE [Euro]	220957,3829	221001,929	221046,5	221091
COSTO TOTALE PER CICLO [Euro/Wh]	0,001041574	0,001041784	0,001042	0,001042

226	227	228	3735	3736	3737	3738	3739	3740
225543,1	223759,2	223806,4	374554,9	374601,7	374648,5	374695,3	374742,1	374788,9
16766,91	16764,72	16762,54	11646,23	11645,07	11643,91	11642,75	11641,6	11640,44
269,9852	269,9283	269,8714	159,96	159,94	159,92	159,9001	159,8801	159,8601
29,54892	29,56274	29,57654	61,12534	61,13206	61,13879	61,14551	61,15223	61,15896
0,530014	0,530076	0,530137	0,67355	0,673582	0,673615	0,673647	0,67368	0,673712
2,074359	2,072953	2,071548	0,594122	0,593983	0,593843	0,593704	0,593564	0,593425
1	1	1	1	1	1	1	1	1
14	15	15	16	16	16	16	16	16
54747	54751	54754	58674	58674	58675	58675	58675	58676
4741	4742	4743	8002	8003	8004	8005	8006	8007
242310	240523,9	240568,9	386201,1	386246,8	386292,4	386338,1	386383,7	386429,4
0,001142	0,001134	0,001134	0,001821	0,001821	0,001821	0,001821	0,001821	0,001822

25735	25736	25738	25739	25740	25741	25742	25743	25744
1404323	1404370	1404417	1404464	1404511	1404558	1404604	1404651,1	1404698
3747,885	3747,783	3747,682	3747,58	3747,479	3747,378	3747,276	3747,1746	3747,073
42,66382	42,6624	42,66098	42,65956	42,65814	42,65671	42,65529	42,653871	42,65245
108,3629	108,3636	108,3643	108,365	108,3656	108,3663	108,367	108,36768	108,3684
0,894945	0,894948	0,89495	0,894953	0,894956	0,894959	0,894962	0,8949646	0,894967
0,089385	0,089381	0,089378	0,089374	0,089371	0,089367	0,089364	0,0893602	0,089357
1	1	1	1	1	1	1	1	1
16	16	16	16	16	16	16	16	16
60076	60076	60076	60077	60077	60077	60077	60077	60077
30002	30003	30004	30005	30006	30007	30008	30009	30010
1408071	1408118	1408165	1408211	1408258	1408305	1408352	1408398,3	1408445
0,006638	0,006638	0,006638	0,006638	0,006638	0,006639	0,006639	0,0066391	0,006639

## Osservazioni:

Tutte le considerazioni generali fatte per la batteria agli ioni di litio tipo A valgono anche per questo caso. I costi di esercizio per inefficienza sono sempre direttamente influenzati dal numero dei cicli totali (come si può vedere dall'equazione 3 dei costi di esercizio). Si osserva che, come nel caso dei 2 cicli al giorno, anche quando voglio fare 4 o 6 cicli al giorno ottengo un numero di sostituzioni necessarie sempre nullo già partendo con l'adoperare la massa minima necessaria per soddisfare le esigenze del ciclo (4267 kg). Come già detto in precedenza, i casi in cui le sostituzioni sono pari a zero non devono essere prese in considerazione. Solo quando vado oltre i 6 cicli al giorno, il numero delle sostituzioni diventa pari a 1. Le soluzioni più economicamente convenienti sono, quindi, quelle che prevedono di adoperare la massa minima richiesta (4267 kg) e di cambiare la batteria una volta sola. Nel caso di 8 cicli al giorno, infatti, ho bisogno di una batteria sostitutiva e il costo totale ammonta a 212512 euro (iterazione 0), mentre nel caso dei 10 cicli al giorno il costo risulta 220957 euro (iterazione 0).

## BATTERIA AGLI IONI DI LITIO - TIPO C

### 4 CICLI AL GIORNO PER 20 ANNI PER UN TOTALE DI 29200 CICLI

N° ITERAZIONE	0	1	2	3
COSTO DEL CAPITALE [Euro]	31803,81197	31595,17156	31641,98	31688,79
COSTO DI ESERCIZIO [Euro]	7183,532766	7175,898872	7168,314	7160,777
POTENZA SPECIFICA DISPONIBILE [W/Kg]	1899,109792	1896,296296	1893,491	1890,694
ENERGIA SPECIFICA DISPONIBILE [Wh/Kg]	17,69861618	17,77582918	17,85292	17,92988
EFFICIENZA	0,496604065	0,497139021	0,497671	0,498199
DoD-DEPTH OF DISCHARGE %	24,3610724	24,21932132	24,07907	23,9403
NUMERO DI SOSTITUZIONI	1	1	1	1
DURATA VITALE IN ANNI	15	16	16	16
NUMERO DI CICLI DI VITA	23305	23458	23610	23761
MASSA [Kg]	674	675	676	677
COSTO TOTALE [Euro]	38987,34474	38771,07043	38810,29	38849,56
COSTO TOTALE PER CICLO [Euro/Wh]	0,000459457	0,000456909	0,000457	0,000458

10	11	12	20	21	30	31	32	42	43
32016,44	31808,48	31854,92	32226,41	32019,19	32433,83	32227,4	32273,12	32730,24	19294,47
7109,294	7102,112	7094,971	7039,241	7032,439	6972,714	6966,234	6959,783	6896,778	6890,619
1871,345	1868,613	1865,889	1844,38	1841,727	1818,182	1815,603	1813,031	1787,709	1785,216
18,46507	18,54103	18,61686	19,21907	19,29379	19,96085	20,03437	20,10776	20,8352	20,9073
0,501806	0,50231	0,50281	0,506716	0,507192	0,511377	0,511832	0,512284	0,516699	0,51713
23,00851	22,8808	22,75438	21,78732	21,67171	20,67968	20,57458	20,47044	19,47982	19,38557
1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
16	17	17	17	18	18	19	19	19	20
24803	24950	25096	26241	26382	27619	27754	27888	29196	29324
684	685	686	694	695	704	705	706	716	717
39125,73	38910,6	38949,89	39265,65	39051,63	39406,54	39193,64	39232,9	39627,02	26185,09
0,000461	0,000459	0,000459	0,000463	0,00046	0,000464	0,000462	0,000462	0,000467	0,000309

Fig 5.37 – Costi di impianto batteria ioni di litio tipo C compiendo 4 cicli al giorno

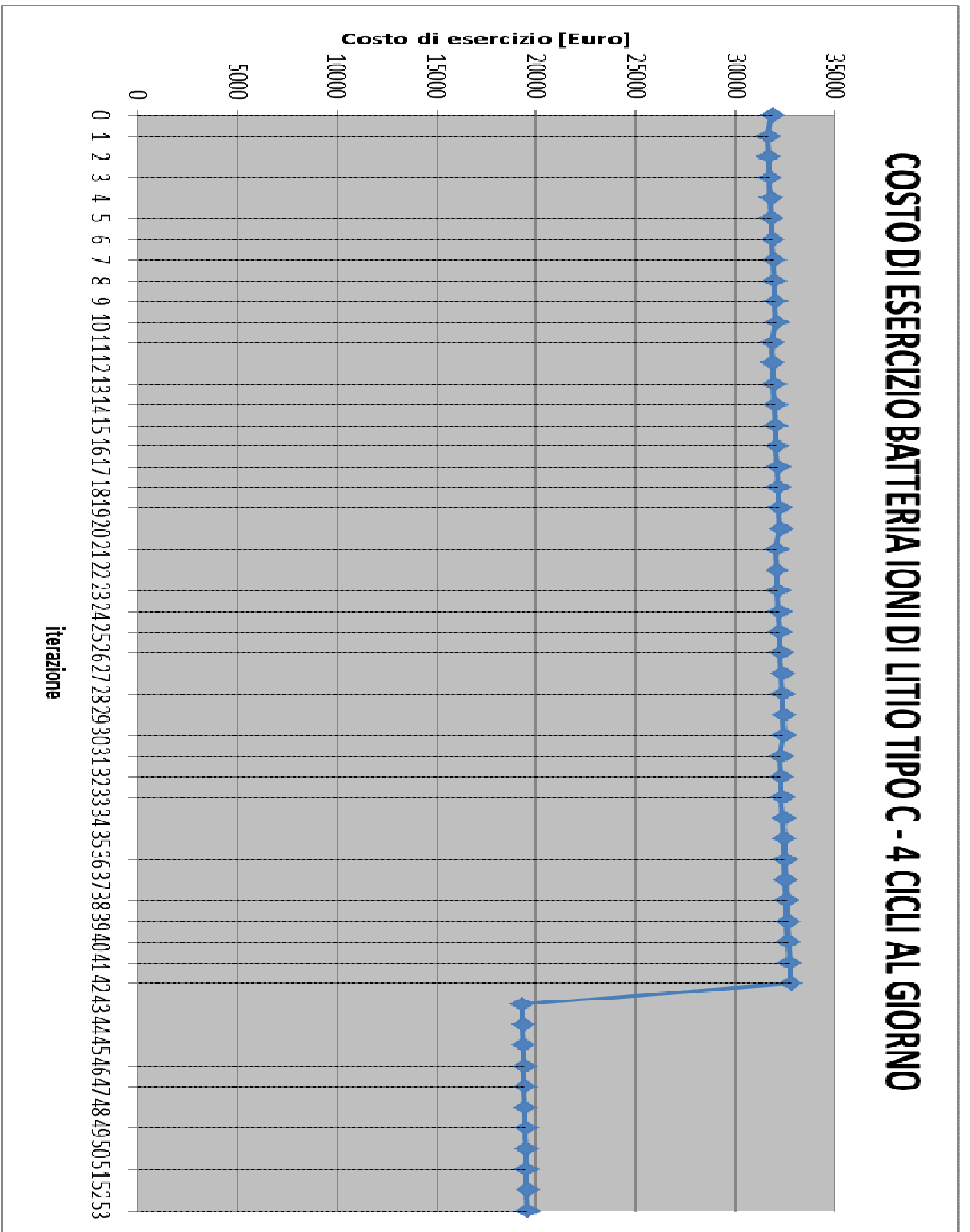




Fig 5.38 – Costi di esercizio batteria ioni di litio tipo C compiendo 4 cicli al giorno

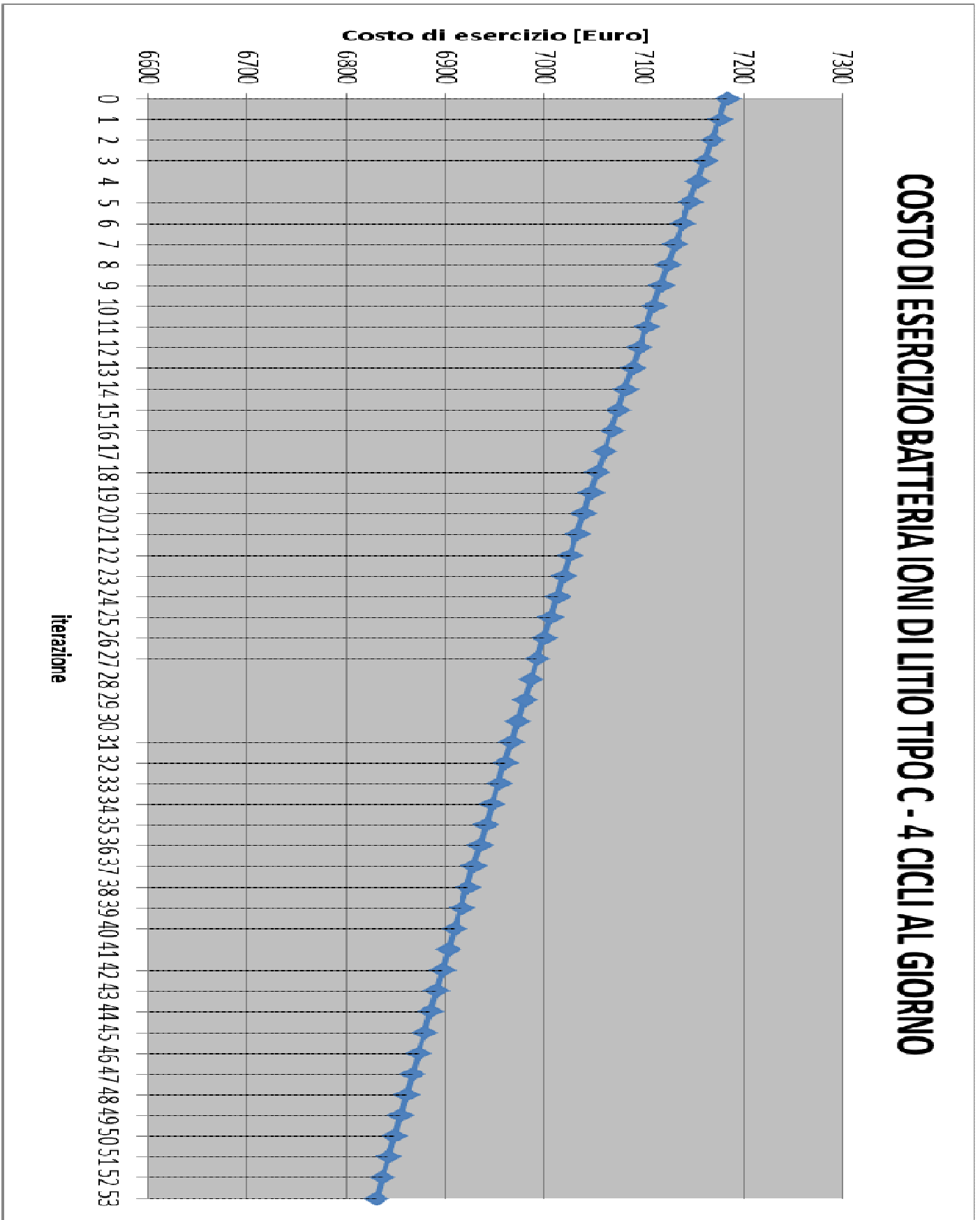


Fig 5.39 – Costi totali batteria ioni di litio tipo C compiendo 4 cicli al giorno

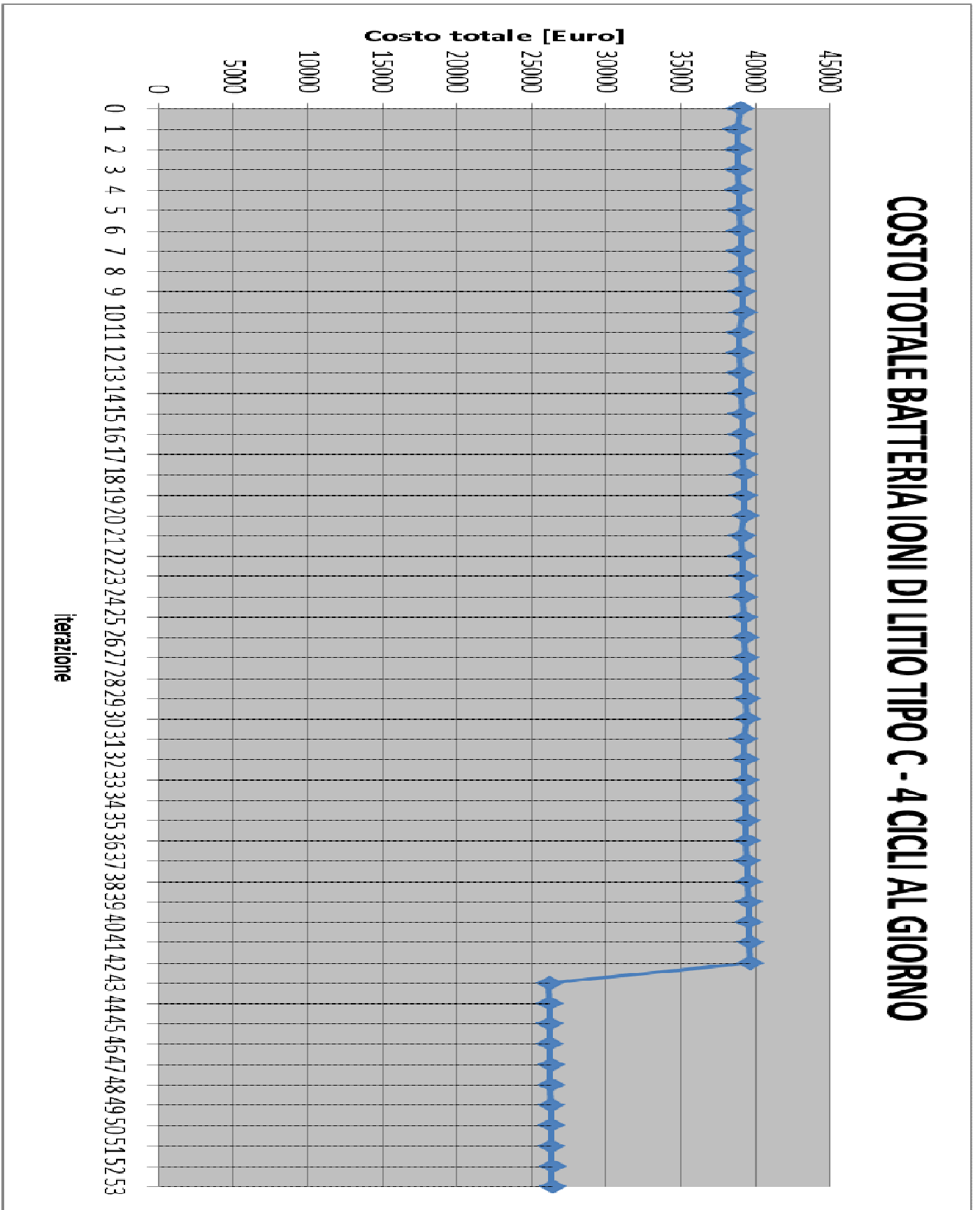
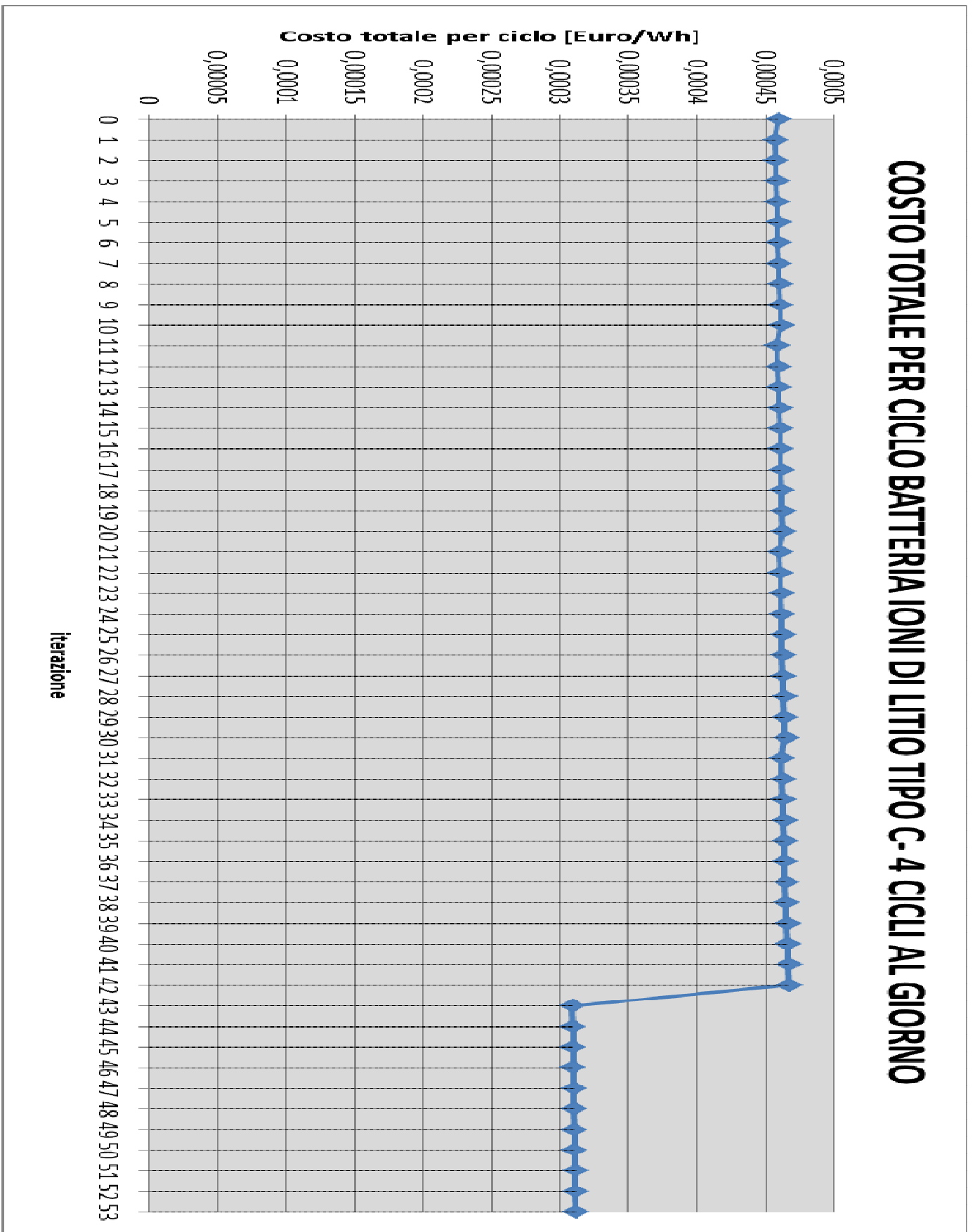


Fig 5.40 – Costi totali per ciclo batteria ioni di litio tipo C compiendo 4 cicli al giorno



## 6 CICLI AL GIORNO PER 20 ANNI PER UN TOTALE DI 43800 CICLI

N° ITERAZIONE	0	1	2	3
COSTO DEL CAPITALE [Euro]	33155,91778	33205,11054	33254,3	33303,5
COSTO DI ESERCIZIO [Euro]	10775,29915	10763,84831	10752,47	10741,17
POTENZA SPECIFICA DISPONIBILE [W/Kg]	1899,109792	1896,296296	1893,491	1890,694
ENERGIA SPECIFICA DISPONIBILE [Wh/Kg]	17,69861618	17,77582918	17,85292	17,92988
EFFICIENZA	0,496604065	0,497139021	0,497671	0,498199
DoD-DEPTH OF DISCHARGE %	24,3610724	24,21932132	24,07907	23,9403
NUMERO DI SOSTITUZIONI	1	1	1	1
DURATA VITALE IN ANNI	10	10	10	10
NUMERO DI CICLI DI VITA	23305	23458	23610	23761
MASSA [Kg]	674	675	676	677
COSTO TOTALE [Euro]	43931,21693	43968,95885	44006,77	44044,66
COSTO TOTALE PER CICLO [Euro/Wh]	0,000345147	0,000345443	0,000346	0,000346

4	5	6	7	20	21	22	36	37	38
33352,69	33401,88	33167,85	33216,63	33850,72	33615,44	33663,81	34340,95	34104,16	34152,12
10729,93	10718,77	10707,67	10696,64	10558,86	10548,66	10538,51	10401,39	10391,92	10382,49
1887,906	1885,125	1882,353	1879,589	1844,38	1841,727	1839,08	1802,817	1800,281	1797,753
18,00671	18,08342	18,16	18,23645	19,21907	19,29379	19,36839	20,40016	20,47296	20,54564
0,498724	0,499245	0,499764	0,500279	0,506716	0,507192	0,507666	0,514072	0,514514	0,514955
23,80299	23,66712	23,53265	23,39958	21,78732	21,67171	21,55722	20,06336	19,9639	19,86533
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	10	11	11	11	12	12	12	13	13
23912	24062	24211	24360	26241	26382	26522	28418	28549	28680
678	679	680	681	694	695	696	710	711	712
44082,62	44120,65	43875,52	43913,27	44409,58	44164,1	44202,32	44742,35	44496,08	44534,62
0,000346	0,000347	0,000345	0,000345	0,000349	0,000347	0,000347	0,000352	0,00035	0,00035

52	53	166	167	168	169	170	197	198
34823,65	34871,62	38699,45	38745,52	38791,59	38535,75	38581,46	39907,13	23519,34
10254,34	10245,44	9366,718	9359,674	9352,64	9345,615	9338,598	9138,803	9132,034
1763,085	1760,66	1523,81	1521,998	1520,19	1518,387	1516,588	1466,208	1464,531
21,55095	21,62189	28,95461	29,01391	29,07312	29,13224	29,19127	30,86468	30,92109
0,520942	0,521358	0,56241	0,562739	0,563067	0,563395	0,563723	0,573057	0,573373
18,57345	18,48704	11,94809	11,90949	11,87112	11,83298	11,79506	10,78499	10,75299
1	1	1	1	1	1	1	1	0
13	13	18	18	18	19	19	19	20
30448	30571	41428	41503	41577	41651	41724	43736	43801
726	727	840	841	842	843	844	873	874
45077,99	45117,06	48066,17	48105,2	48144,23	47881,36	47920,06	49045,93	32651,37
0,000354	0,000354	0,000378	0,000378	0,000378	0,000376	0,000376	0,000385	0,000257

199	200	201	202	203	204	205	206	207
23546,25	23573,16	23600,07	23626,98	23653,89	23680,8	23707,71	23734,62	23761,53
9125,2739	9118,521	9111,776	9105,039	9098,309	9091,587	9084,873	9078,166	9071,466
1462,8571	1461,187	1459,521	1457,859	1456,2	1454,545	1452,894	1451,247	1449,604
30,97741	31,03365	31,0898	31,14587	31,20186	31,25776	31,31358	31,36931	31,42497
0,5736893	0,574005	0,57432	0,574635	0,574949	0,575263	0,575577	0,57589	0,576203
10,721177	10,68953	10,65806	10,62675	10,59562	10,56465	10,53385	10,50321	10,47273
0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	20	20	20	20	20	20	20	20
43866,417	43931,18	43995,69	44059,95	44123,96	44187,71	44251,22	44314,48	44377,49
875	876	877	878	879	880	881	882	883
32671,524	32691,68	32711,85	32732,02	32752,2	32772,39	32792,58	32812,79	32833
0,0002567	0,000257	0,000257	0,000257	0,000257	0,000257	0,000258	0,000258	0,000258

## **8 CICLI AL GIORNO PER 20 ANNI PER UN TOTALE DI 58400 CICLI**

N° ITERAZIONE	0	1	2	3
COSTO DEL CAPITALE [Euro]	47957,35849	47214,47427	47284,42	47354,37
COSTO DI ESERCIZIO [Euro]	14367,06553	14351,79774	14336,63	14321,55
POTENZA SPECIFICA DISPONIBILE [W/Kg]	1899,109792	1896,296296	1893,491	1890,694
ENERGIA SPECIFICA DISPONIBILE [Wh/Kg]	17,69861618	17,77582918	17,85292	17,92988
EFFICIENZA	0,496604065	0,497139021	0,497671	0,498199
DoD-DEPTH OF DISCHARGE %	24,3610724	24,21932132	24,07907	23,9403
NUMERO DI SOSTITUZIONI	2	2	2	2
DURATA VITALE IN ANNI	7	8	8	8
NUMERO DI CICLI DI VITA	23305	23458	23610	23761
MASSA [Kg]	674	675	676	677
COSTO TOTALE [Euro]	62324,42402	61566,27201	61621,05	61675,92
COSTO TOTALE PER CICLO [Euro/Wh]	0,00036724	0,000362773	0,000363	0,000363

20	21	22	42	43	44	66	67	68	93
48543,47	47800,69	47869,46	49245,02	35271,21	35320,4	36402,64	36143,21	36191,98	37411,39
14078,48	14064,88	14051,34	13793,56	13781,24	13768,97	13509,81	13498,47	13487,15	13213,94
1844,38	1841,727	1839,08	1787,709	1785,216	1782,73	1729,73	1727,395	1725,067	1668,84
19,21907	19,29379	19,36839	20,8352	20,9073	20,97928	22,5338	22,60316	22,67241	24,36818
0,506716	0,507192	0,507666	0,516699	0,51713	0,51756	0,526641	0,527038	0,527435	0,537007
21,78732	21,67171	21,55722	19,47982	19,38557	19,29215	17,42727	17,35035	17,27404	15,5481
2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
8	9	9	9	10	10	10	11	11	11
26241	26382	26522	29196	29324	29451	32110	32225	32340	35038
694	695	696	716	717	718	740	741	742	767
62621,96	61865,56	61920,81	63038,58	49052,44	49089,37	49912,45	49641,67	49679,14	50625,33
0,000369	0,000365	0,000365	0,000371	0,000289	0,000289	0,000294	0,000293	0,000293	0,000298

94	95	123	124	125	158	159	160	199	200
37146,27	37194,64	38548,93	38277,24	38325,21	39908,1	39628,21	39675,79	41531,13	41241,14
13203,36	13192,79	12905,37	12895,38	12885,4	12564,53	12555,04	12545,56	12185,07	12176,05
1666,667	1664,499	1606,023	1604,01	1602,003	1538,462	1536,615	1534,772	1466,208	1464,531
24,43461	24,50095	26,3164	26,37978	26,44305	28,47694	28,53697	28,59691	30,86468	30,92109
0,537378	0,537749	0,547819	0,548169	0,548519	0,559762	0,560094	0,560426	0,573057	0,573373
15,48563	15,42362	13,85513	13,80453	13,75426	12,26532	12,22483	12,18458	10,78499	10,75299
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
12	12	12	13	13	13	14	14	14	15
35140	35242	37908	37998	38087	40820	40897	40974	43736	43801
768	769	797	798	799	832	833	834	873	874
50349,63	50387,43	51454,3	51172,62	51210,6	52472,63	52183,25	52221,35	53716,2	53417,19
0,000297	0,000297	0,000303	0,000302	0,000302	0,000309	0,000307	0,000308	0,000317	0,000315

201	249	250	251	309	310	311	385	389	390
41288,33	43553,29147	43250,28	43297,09	46011,93	45692,77	45739,21	49175,45	48835,02	48881,09
12167,03	11745,96709	11737,43	11728,9	11249,47	11241,46	11233,46	10665,01	10657,64	10650,27
1462,857	1386,782232	1385,281	1383,784	1302,136	1300,813	1299,492	1208,687	1207,547	1206,409
30,97741	33,58470138	33,63708	33,68939	36,5974	36,64545	36,69344	40,06555	40,10881	40,15202
0,573689	0,588442604	0,588742	0,589041	0,605839	0,60612	0,6064	0,626317	0,626576	0,626834
10,72118	9,374592915	9,349865	9,325256	8,077777	8,058986	8,040275	6,849022	6,83518	6,821389
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
15	15	16	16	16	17	17	17	18	18
43866	46709	46763	46817	49623	49667	49710	52554	52588	52622
875	923	924	925	983	984	985	1059	1060	1061
53455,36	55299,25856	54987,71	55025,98	57261,4	56934,23	56972,67	59840,46	59492,66	59531,37
0,000315	0,000325845	0,000324	0,000324	0,000337	0,000335	0,000336	0,000353	0,000351	0,000351

484	485	486	620	621
53349,96	52980,94	53026,65	59152,14	58742,73
9973,657	9967,057	9960,465	9141,018	9135,355
1105,354	1104,4	1103,448	989,1808	988,417
44,08204	44,12002	44,15796	48,83666	48,86878
0,650541	0,650772	0,651003	0,679715	0,679914
5,692793	5,682984	5,673207	4,598492	4,59192
1	1	1	1	0
18	19	19	19	20
55471	55496	55521	58382	58400
1158	1159	1160	1294	1295
63323,61	62948	62987,12	68293,16	67878,08
0,000373	0,000371	0,000371	0,000402	0,0004

## 10 CICLI AL GIORNO PER 20 ANNI PER UN TOTALE DI 73000 CICLI

N° ITERAZIONE	0	1	2	3
COSTO DEL CAPITALE [Euro]	61710,04645	61801,60438	61893,16	61984,72
COSTO DI ESERCIZIO [Euro]	17958,83191	17939,74718	17920,78	17901,94
POTENZA SPECIFICA DISPONIBILE [W/Kg]	1899,109792	1896,296296	1893,491	1890,694
ENERGIA SPECIFICA DISPONIBILE [Wh/Kg]	17,69861618	17,77582918	17,85292	17,92988
EFFICIENZA	0,496604065	0,497139021	0,497671	0,498199
DoD-DEPTH OF DISCHARGE %	24,3610724	24,21932132	24,07907	23,9403
NUMERO DI SOSTITUZIONI	3	3	3	3
DURATA VITALE IN ANNI	6	6	6	6
NUMERO DI CICLI DI VITA	23305	23458	23610	23761
MASSA [Kg]	674	675	676	677
COSTO TOTALE [Euro]	79668,87837	79741,35156	79813,95	79886,66
COSTO TOTALE PER CICLO [Euro/Wh]	0,000375552	0,000375894	0,000376	0,000377

16	17	18	42	43	44	72	73	74	107
49095,81	49166,97	49238,12	50945,8	50152,26	50222,21	52180,74	51377,14	51445,92	53715,59
17667,01	17649,65	17632,37	17241,94	17226,55	17211,21	16802,79	16788,85	16774,94	16334,65
1855,072	1852,388	1849,711	1787,709	1785,216	1782,73	1715,818	1713,521	1711,23	1638,924
18,91895	18,99416	19,06925	20,8352	20,9073	20,97928	22,9483	23,017	23,08559	25,28881
0,504784	0,505271	0,505755	0,516699	0,51713	0,51756	0,529009	0,529399	0,529789	0,542131
22,26125	22,14101	22,02195	19,47982	19,38557	19,29215	16,97486	16,90154	16,8288	14,71351
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
7	7	7	7	8	8	8	9	9	9
25673	25816	25959	29196	29324	29451	32792	32904	33015	36424
690	691	692	716	717	718	746	747	748	781
66762,82	66816,61	66870,49	68187,74	67378,81	67433,42	68983,52	68165,99	68220,86	70050,24
0,000315	0,000315	0,000315	0,000321	0,000318	0,000318	0,000325	0,000321	0,000322	0,00033

108	109	149	150	151	199	200	201	263	264
38468,74	38517,93	40485,64	40191,64	40240,41	42581,67	42273,23	42321,6	45320,39	44992,54
16321,79	16308,96	15813,15	15801,14	15789,15	15231,34	15220,06	15208,79	14534,05	14523,54
1636,829	1634,738	1555,286	1553,398	1551,515	1466,208	1464,531	1462,857	1366,062	1364,606
25,35379	25,41867	27,9325	27,99336	28,05414	30,86468	30,92109	30,97741	34,31114	34,36246
0,542491	0,542851	0,556749	0,557085	0,557422	0,573057	0,573373	0,573689	0,592602	0,592897
14,65703	14,60095	12,64113	12,59834	12,55581	10,78499	10,75299	10,72118	9,039011	9,015887
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	10	10	11	11	11	12	12	12	13
36520	36616	40112	40192	40272	43736	43801	43866	47446	47497
782	783	823	824	825	873	874	875	937	938
54790,53	54826,89	56298,79	55992,77	56029,56	57813,01	57493,29	57530,39	59854,44	59516,08
0,000258	0,000258	0,000265	0,000264	0,000264	0,000273	0,000271	0,000271	0,000282	0,000281

265	344	345	346	456	457	458	620	621	622
45040,51	48829,86	48476,77	48524,34	53757,36	53368,12	53415,3	61059,54	60615,92	60662,73
14513,04	13717,87	13708,23	13698,6	12701,86	12693,35	12684,85	11426,27	11419,19	11412,12
1363,152	1257,367	1256,133	1254,902	1132,743	1131,742	1130,742	989,1808	988,417	987,6543
34,41371	38,23991	38,28567	38,33137	42,99837	43,03775	43,07708	48,83666	48,86878	48,90087
0,593192	0,615481	0,615751	0,616021	0,64396	0,644198	0,644437	0,679715	0,679914	0,680112
8,992873	7,465021	7,448781	7,432606	5,980881	5,970125	5,959405	4,598492	4,59192	4,585366
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
13	13	14	14	14	15	15	15	16	16
47548	51063	51102	51141	54729	54756	54784	58382	58400	58417
939	1018	1019	1020	1130	1131	1132	1294	1295	1296
59553,55	62547,73	62185	62222,95	66459,23	66061,47	66100,15	72485,82	72035,12	72074,85
0,000281	0,000295	0,000293	0,000293	0,000313	0,000311	0,000312	0,000342	0,00034	0,00034

891	892	893	1435	1436	1437	3215	3216	3217	29572
73253,99	72718,37	72764,81	97932,98	97209,34	97255,41	179169,2	177822,1	177867,8	1382624
9766,042	9760,766	9755,494	7541,294	7538,145	7535	4415,475	4414,513	4413,551	1315,188
817,8914	817,3691	816,8475	606,9227	606,6351	606,3477	329,1335	329,0488	328,9643	42,31965
56,33782	56,36163	56,38541	66,44598	66,46046	66,47492	81,37943	81,38428	81,38913	98,98548
0,726252	0,7264	0,726548	0,788613	0,788702	0,78879	0,876232	0,876259	0,876286	0,963135
3,295955	3,292459	3,28897	2,073721	2,072287	2,070854	0,918212	0,917921	0,917631	0,097064
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
16	17	17	17	18	18	18	19	19	19
62048	62058	62068	65699	65703	65707	69349	69350	69351	72066
1565	1566	1567	2109	2110	2111	3889	3890	3891	30246
83020,03	82479,14	82520,3	105474,3	104747,5	104790,4	183584,7	182236,6	182281,4	1383939
0,000391	0,000389	0,000389	0,000497	0,000494	0,000494	0,000865	0,000859	0,000859	0,006524



## Osservazioni:

Tutte le considerazioni generali fatte per la batteria agli ioni di litio tipo A valgono anche per questo caso. I costi di esercizio per inefficienza sono sempre direttamente influenzati dal numero dei cicli totali (come si può vedere dall'equazione 3 dei costi di esercizio) e aumentano del 50% ogni volta che aumento di 2 i cicli per ogni giorno. Si osserva che, adoperando la massa minima richiesta per questo tipo di batteria (674 kg) e volendo fare 4 cicli al giorno, devo preoccuparmi di fare una sostituzione e devo sostenere un costo di 38987 euro . Quindi , appena vado oltre i 2 cicli al giorno, il numero delle sostituzioni incomincia a salire e nel caso dei 6 cicli al giorno ho bisogno di una batteria sostitutiva e il costo totale ammonta a 43931 euro . Nel caso dei 4 cicli al giorno, la soluzione meno onerosa è quella che prevede di adoperare una massa di 675 kg tenendo conto di dover fare una sostituzione per un costo totale di 38771 euro (iterazione 1). Anche negli altri casi la configurazione più economicamente conveniente è quella in cui si prevede di cambiare la batteria una volta sola: nel caso dei 6 cicli al giorno la massa da utilizzare è di 680 kg e il costo totale da sostenere è 43875 euro (iterazione 6), nel caso di 8 cicli al giorno devo utilizzare una massa di 717 kg per un costo totale di 49052 kg (iterazione 43) e nel caso dei 10 cicli al giorno mi conviene adoperare una massa di 782 kg spendendo in totale 54790 euro (iterazione 108).

# SUPERCAPACITORE

## 4 CICLI AL GIORNO PER 20 ANNI PER UN TOTALE DI 29200 CICLI

N° ITERAZIONE	0	1	2	3
COSTO DEL CAPITALE [Euro]	95128,6	95211,9	95295,2	95378,5
COSTO DI ESERCIZIO [Euro]	1736,784218	1735,501032	1734,22	1732,941
POTENZA SPECIFICA DISPONIBILE [W/Kg]	1120,84063	1119,860017	1118,881	1117,904
ENERGIA SPECIFICA DISPONIBILE [Wh/Kg]	2,543359269	2,543864448	2,544369	2,544872
EFFICIENZA	0,878292458	0,878382379	0,878472	0,878562
DoD-DEPTH OF DISCHARGE %	100,051083	99,94369777	99,83654	99,72961
NUMERO DI SOSTITUZIONI	0	0	0	0
NUMERO DI CICLI DI VITA	1000430	999262	998109	996970
MASSA [Kg]	1142	1143	1144	1145
COSTO TOTALE [Euro]	96865,38422	96947,40103	97029,42	97111,44
COSTO TOTALE PER CICLO [Euro/Wh]	0,001141537	0,001142504	0,001143	0,001144

10	19	20	21	30	40	41	49	50	51
95961,6	96711,3	96794,6	96877,9	97627,6	98460,6	98543,9	99210,3	99293,6	99376,9
1724,054	1712,788	1711,547	1710,308	1699,256	1687,177	1685,981	1676,483	1675,305	1674,129
1111,111	1102,498	1101,549	1100,602	1092,15	1082,91	1081,995	1074,727	1073,826	1072,925
2,548375	2,55282	2,55331	2,553799	2,558167	2,562949	2,563423	2,567188	2,567655	2,568122
0,879185	0,879974	0,880061	0,880148	0,880922	0,881769	0,881853	0,882518	0,882601	0,882683
98,98739	98,04901	97,94583	97,84286	96,92572	95,92642	95,82761	95,04432	94,9473	94,85047
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
989401	980675	979773	978884	971477	964450	963815	959161	958633	958115
1152	1161	1162	1163	1172	1182	1183	1191	1192	1193
97685,65	98424,09	98506,15	98588,21	99326,86	100147,8	100229,9	100886,8	100968,9	101051
0,001151	0,00116	0,001161	0,001162	0,001171	0,00118	0,001181	0,001189	0,00119	0,001191

Fig 5.41 – Costi di impianto supercapacitore compiendo 4 cicli al giorno

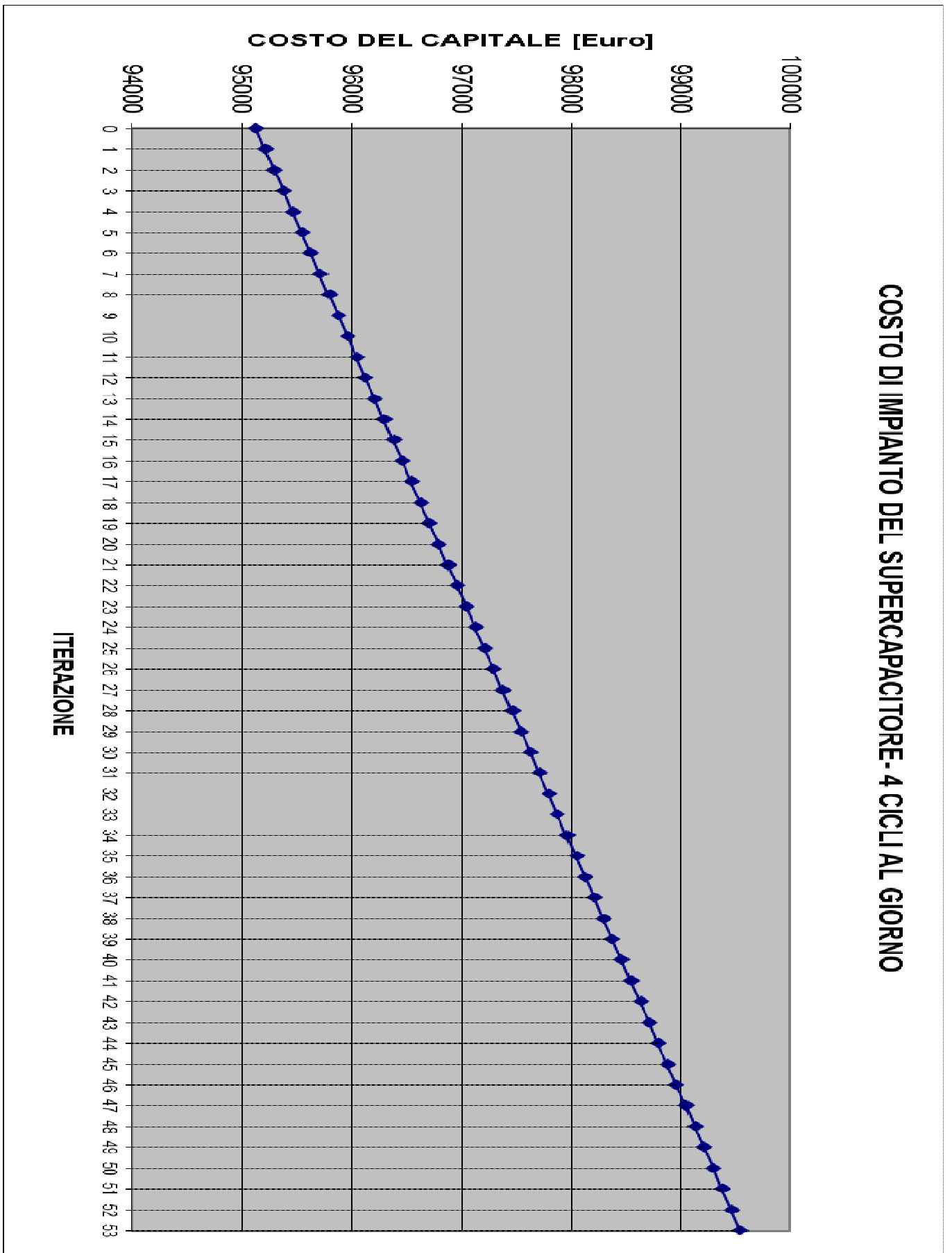


Fig 5.42 – Costi di esercizio supercapacitore compiendo 4 cicli al giorno

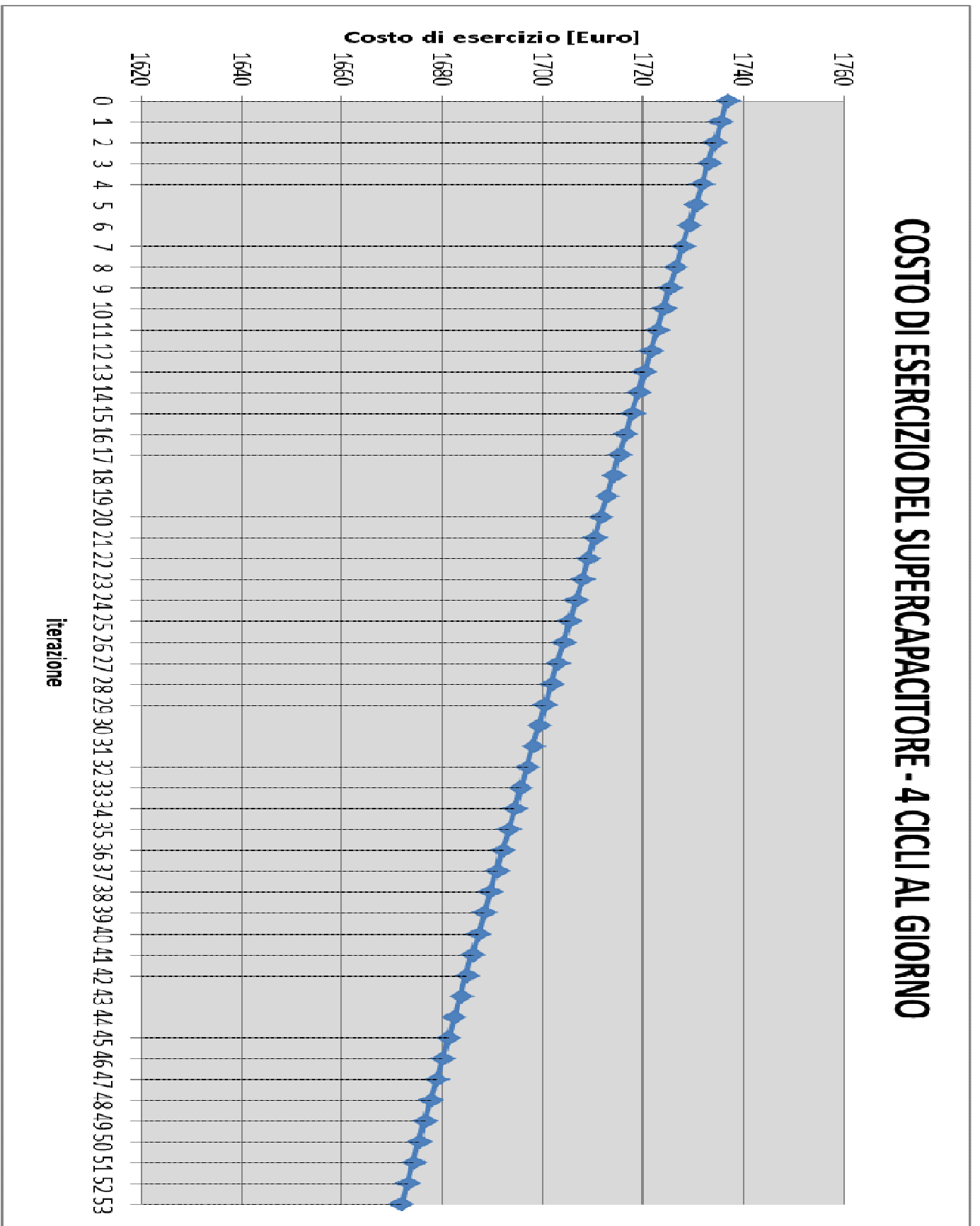


Fig 5.43 – Costi totali supercapacitore compiendo 4 cicli al giorno

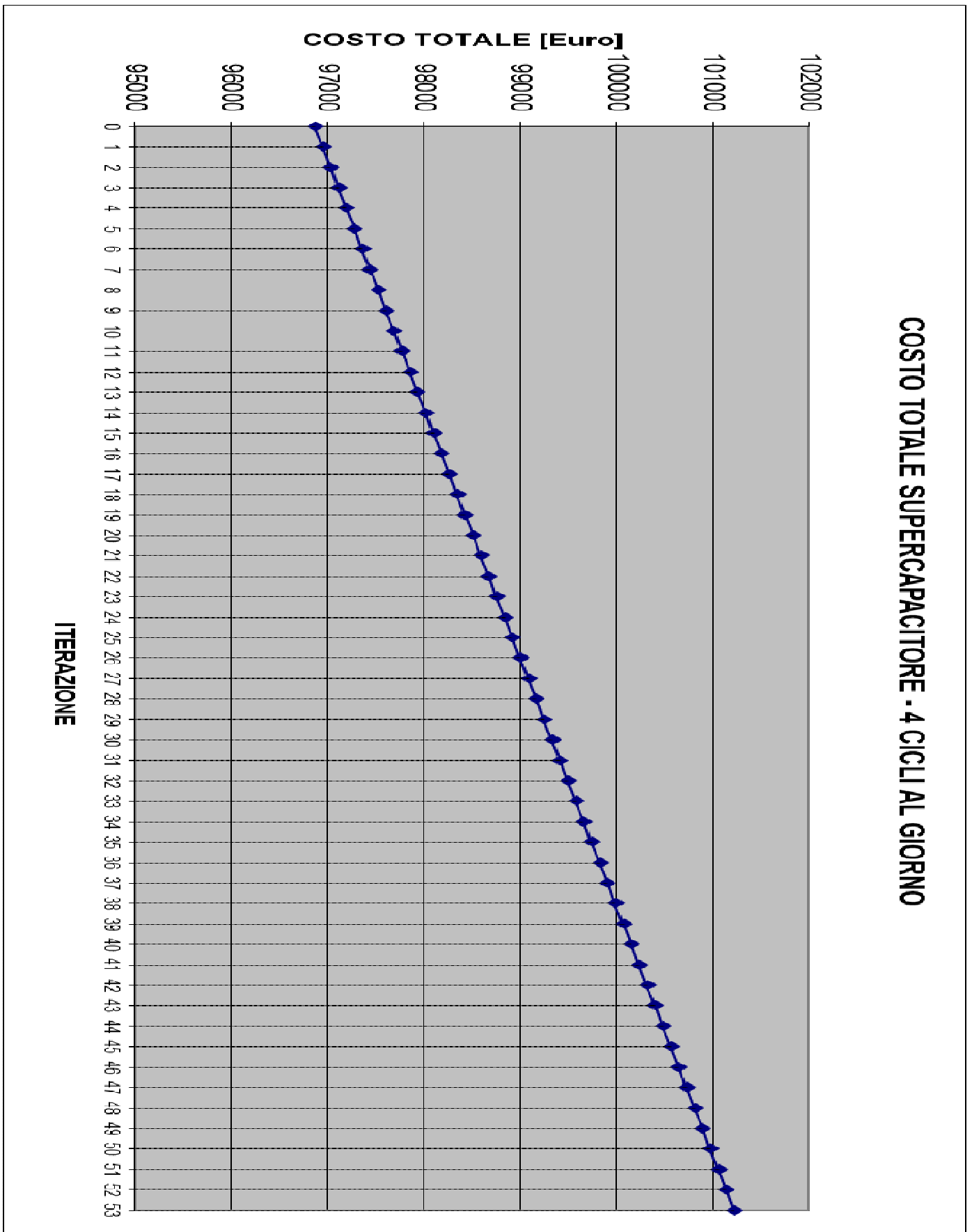
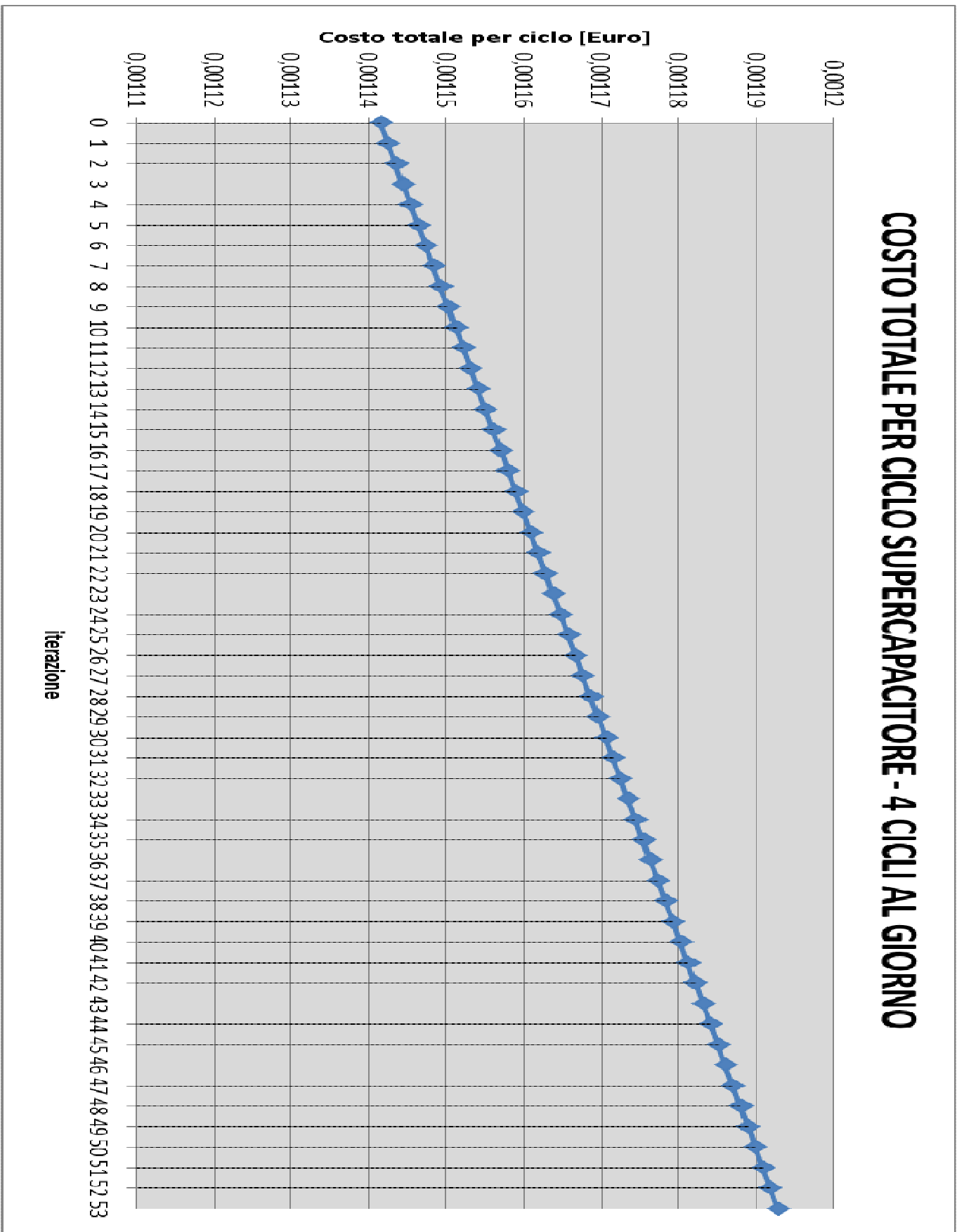


Fig 5.44 – Costi totali per ciclo supercapacitore compiendo 4 cicli al giorno



## 6 CICLI AL GIORNO PER 20 ANNI PER UN TOTALE DI 43800 CICLI

N° ITERAZIONE	0	1	2	3
COSTO DEL CAPITALE [Euro]	95128,6	95211,9	95295,2	95378,5
COSTO DI ESERCIZIO [Euro]	2605,176328	2603,251547	2601,33	2599,412
POTENZA SPECIFICA DISPONIBILE [W/Kg]	1120,84063	1119,860017	1118,881	1117,904
ENERGIA SPECIFICA DISPONIBILE [Wh/Kg]	2,543359269	2,543864448	2,544369	2,544872
EFFICIENZA	0,878292458	0,878382379	0,878472	0,878562
DoD-DEPTH OF DISCHARGE %	100,051083	99,94369777	99,83654	99,72961
NUMERO DI SOSTITUZIONI	0	0	0	0
NUMERO DI CICLI DI VITA	1000430	999262	998109	996970
MASSA [Kg]	1142	1143	1144	1145
COSTO TOTALE [Euro]	97733,77633	97815,15155	97896,53	97977,91
COSTO TOTALE PER CICLO [Euro/Wh]	0,000767847	0,000768487	0,000769	0,00077

10	20	30	31	40	49	50	51
95961,6	96794,6	97627,6	97710,9	98460,6	99210,3	99293,6	99376,9
2586,081	2567,32	2548,884	2547,058	2530,766	2514,725	2512,957	2511,193
1111,111	1101,549	1092,15	1091,219	1082,91	1074,727	1073,826	1072,925
2,548375	2,55331	2,558167	2,558649	2,562949	2,567188	2,567655	2,568122
0,879185	0,880061	0,880922	0,881008	0,881769	0,882518	0,882601	0,882683
98,98739	97,94583	96,92572	96,82487	95,92642	95,04432	94,9473	94,85047
0	0	0	0	0	0	0	0
989401	979773	971477	970718	964450	959161	958633	958115
1152	1162	1172	1173	1182	1191	1192	1193
98547,68	99361,92	100176,5	100258	100991,4	101725	101806,6	101888,1
0,000774	0,000781	0,000787	0,000788	0,000793	0,000799	0,0008	0,0008

Fig 5.45 – Costi di impianto supercapacitore compiendo 6 cicli al giorno

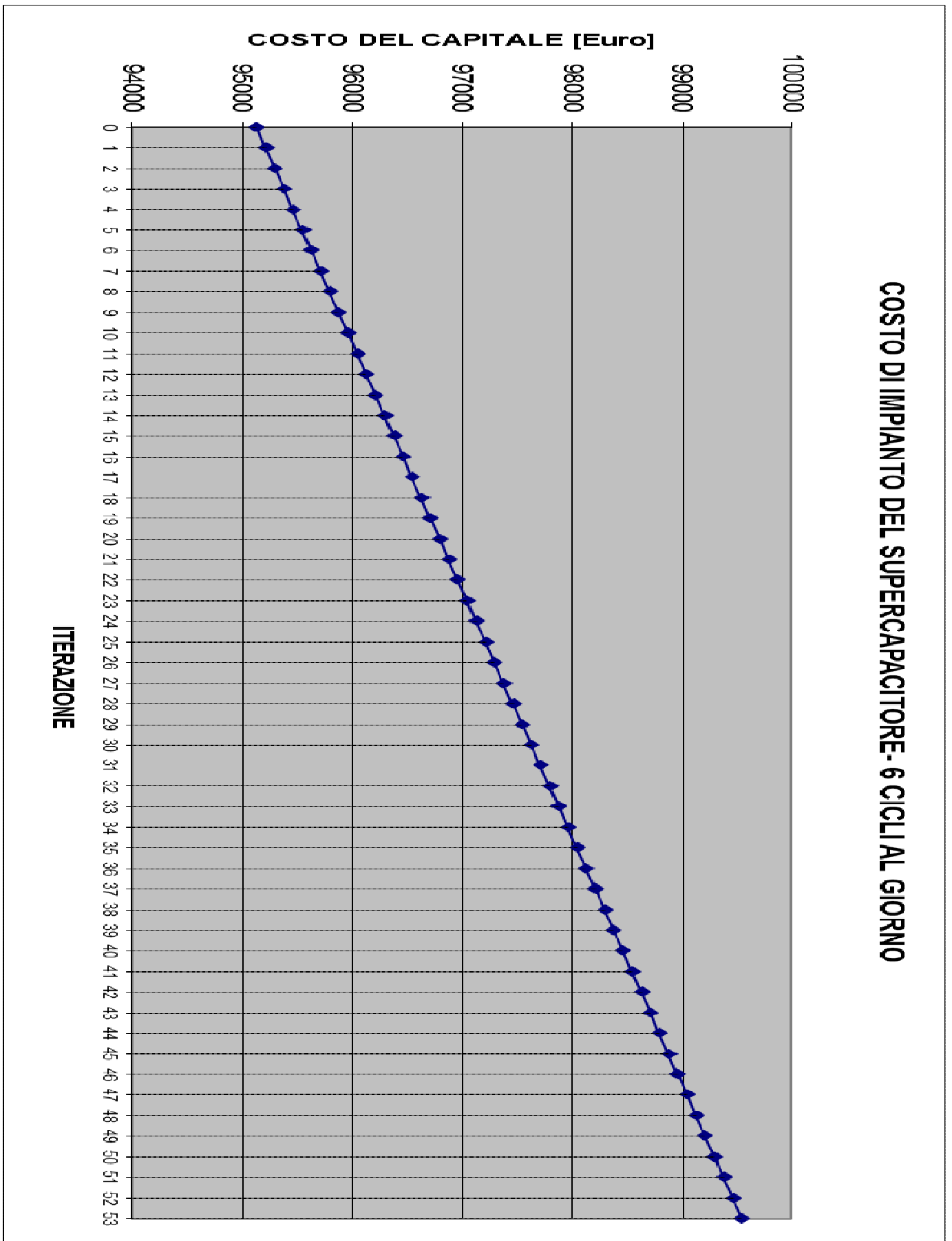




Fig 5.46 – Costi di esercizio supercapacitore compiendo 6 cicli al giorno

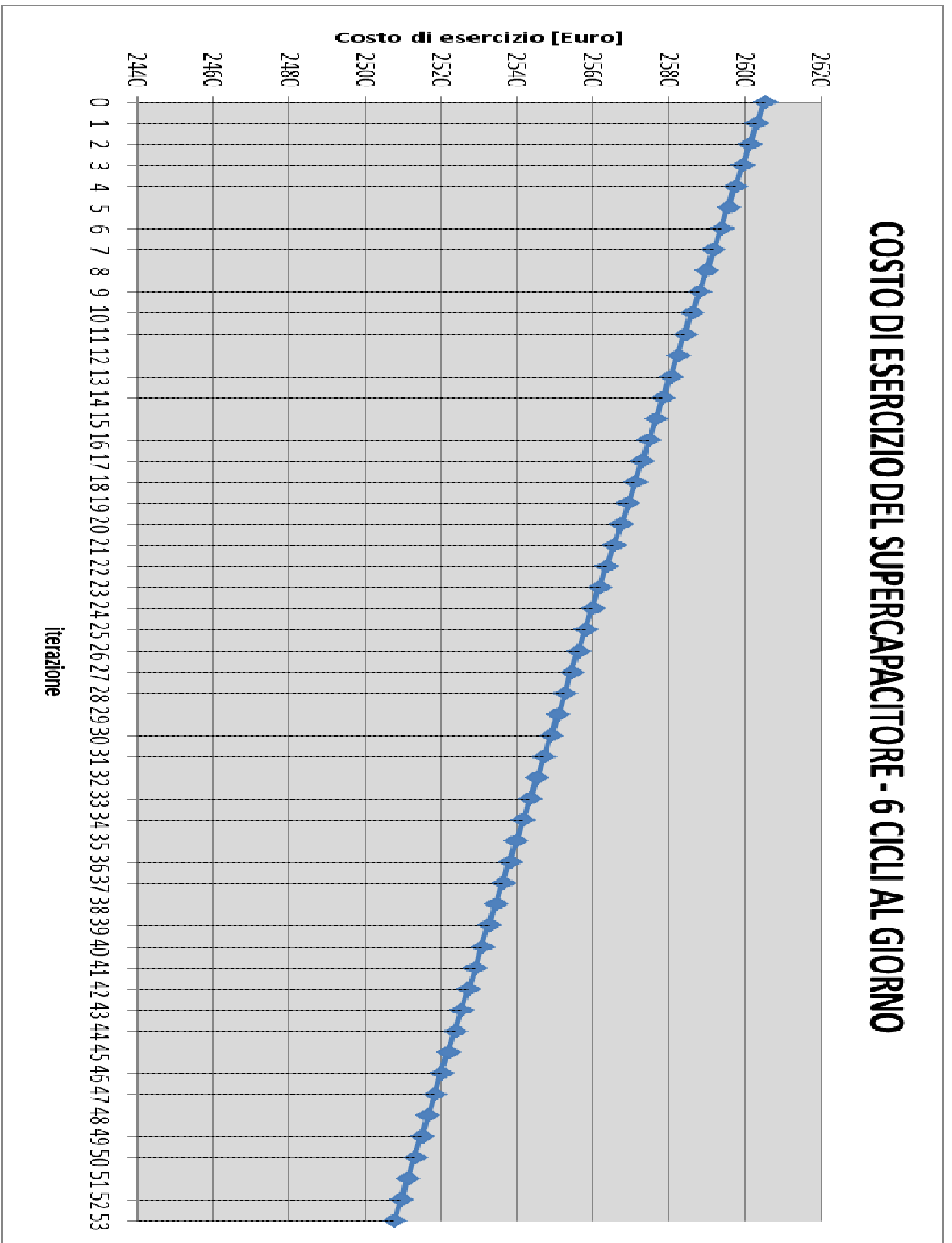


Fig 5.47 – Costi totali supercapacitore compiendo 6 cicli al giorno

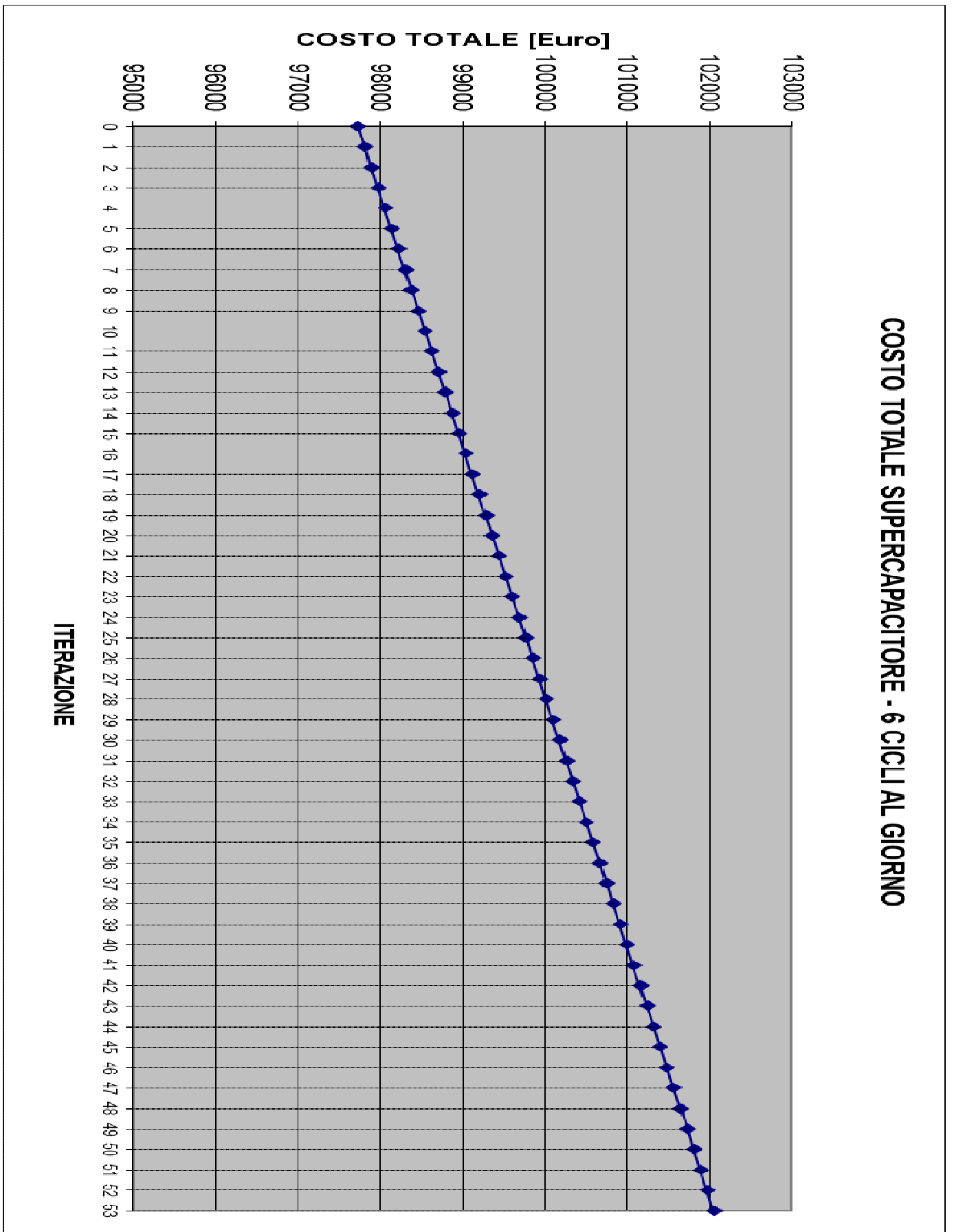
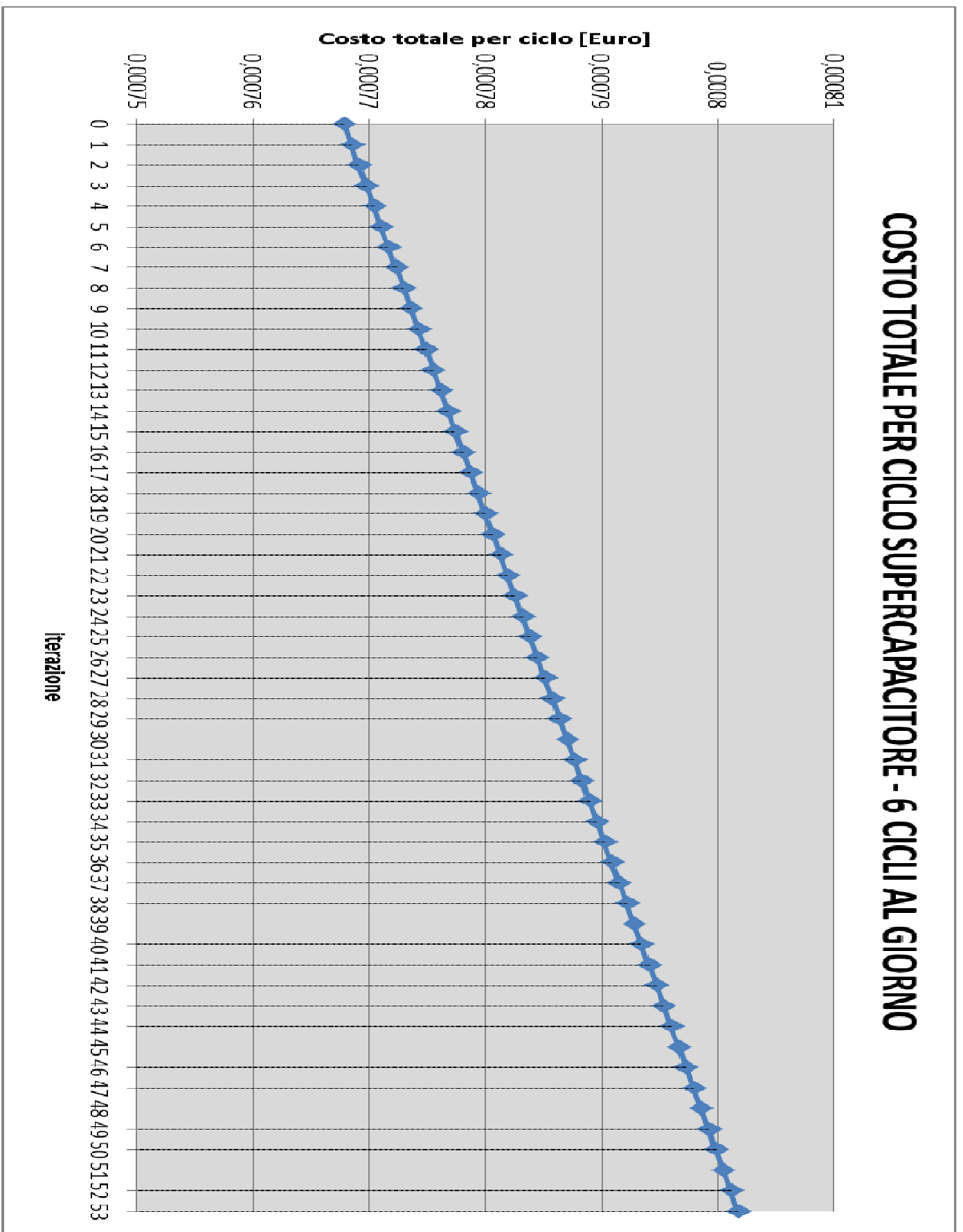


Fig 5.48 – Costi totali per ciclo supercapacitore compiendo 6 cicli al giorno



## SUPERCAPACITORE

### 8 CICLI AL GIORNO PER 20 ANNI PER UN TOTALE DI 58400 CICLI

N° ITERAZIONE	0
COSTO DEL CAPITALE [Euro]	95128,6
COSTO DI ESERCIZIO [Euro]	3473,568437
POTENZA SPECIFICA DISPONIBILE [W/Kg]	1120,84063
ENERGIA SPECIFICA DISPONIBILE [Wh/Kg]	2,543359269
EFFICIENZA	0,878292458
DoD-DEPTH OF DISCHARGE %	100,051083
NUMERO DI SOSTITUZIONI	0
NUMERO DI CICLI DI VITA	1000430
MASSA [Kg]	1142
COSTO TOTALE [Euro]	<b>98602,16844</b>
COSTO TOTALE PER CICLO [Euro/Wh]	0,000581003

### 10 CICLI AL GIORNO PER 20 ANNI PER UN TOTALE DI 73000 CICLI

N° ITERAZIONE	0
COSTO DEL CAPITALE [Euro]	95128,6
COSTO DI ESERCIZIO [Euro]	4341,960546
POTENZA SPECIFICA DISPONIBILE [W/Kg]	1120,84063
ENERGIA SPECIFICA DISPONIBILE [Wh/Kg]	2,543359269
EFFICIENZA	0,878292458
DoD-DEPTH OF DISCHARGE %	100,051083
NUMERO DI SOSTITUZIONI	0
NUMERO DI CICLI DI VITA	1000430
MASSA [Kg]	<b>1142</b>
COSTO TOTALE [Euro]	<b>99470,56055</b>
COSTO TOTALE PER CICLO [Euro/Wh]	0,000468896

## **Osservazioni:**

Tutte le considerazioni generali fatte per la batteria agli ioni di litio valgono anche per i supercondensatori. I costi di esercizio per inefficienza sono sempre direttamente influenzati dal numero dei cicli totali (come si può vedere dall'equazione 3 dei costi di esercizio). Si osserva che, in tutti i casi, ottengo sempre un numero di sostituzioni necessarie nullo già partendo con l'adoperare la massa minima necessaria per soddisfare le esigenze del ciclo(1142 kg ). Come già detto in precedenza, i casi in cui le sostituzioni sono pari a zero non devono essere prese in considerazione.

## SUPERCAPACITORE IBRIDO

### 4 CICLI AL GIORNO PER 20 ANNI PER UN TOTALE DI 29200 CICLI

N° ITERAZIONE	0	1	2	3
COSTO DEL CAPITALE [Euro]	362848	363120	363392	363664
COSTO DI ESERCIZIO [Euro]	4556,679619	4553,937607	4551,199	4548,463
POTENZA SPECIFICA DISPONIBILE [W/Kg]	959,5202399	958,8014981	958,0838	957,3672
ENERGIA SPECIFICA DISPONIBILE [Wh/Kg]	2,177491303	2,178873644	2,180254	2,181634
EFFICIENZA	0,680684411	0,680876561	0,681069	0,68126
DoD-DEPTH OF DISCHARGE %	100,0422271	99,90386694	99,76587	99,62823
NUMERO DI SOSTITUZIONI	0	0	0	0
NUMERO DI CICLI DI VITA	300100	299649	299206	298770
MASSA [Kg]	1334	1335	1336	1337
COSTO TOTALE [Euro]	367404,6796	367673,9376	367943,2	368212,5
COSTO TOTALE PER CICLO [Euro/Wh]	0,004329784	0,004332957	0,004336	0,004339

8	16	23	31	39	46	47	48	49	50
365024	367200	369104	371280	373456	375360	375632	375904	376176	376448
4534,827	4513,163	4494,361	4473,048	4451,918	4433,578	4430,97	4428,364	4425,761	4423,161
953,8003	948,1481	943,2572	937,7289	932,2651	927,5362	926,8646	926,1939	925,5242	924,8555
2,188506	2,199419	2,208887	2,219616	2,230248	2,239472	2,240784	2,242094	2,243403	2,24471
0,682216	0,683734	0,685051	0,686545	0,688026	0,689311	0,689494	0,689676	0,689859	0,690041
98,94536	97,87095	96,94875	95,91469	94,90127	94,03097	93,90787	93,78508	93,66259	93,5404
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
296697	293737	291495	289312	287515	286247	286088	285935	285787	285645
1342	1350	1357	1365	1373	1380	1381	1382	1383	1384
369558,8	371713,2	373598,4	375753	377907,9	379793,6	380063	380332,4	380601,8	380871,2
0,004355	0,004381	0,004403	0,004428	0,004454	0,004476	0,004479	0,004482	0,004485	0,004488

Fig 5.49 – Costi di impianto supercapacitore ibrido compiendo 4 cicli al giorno

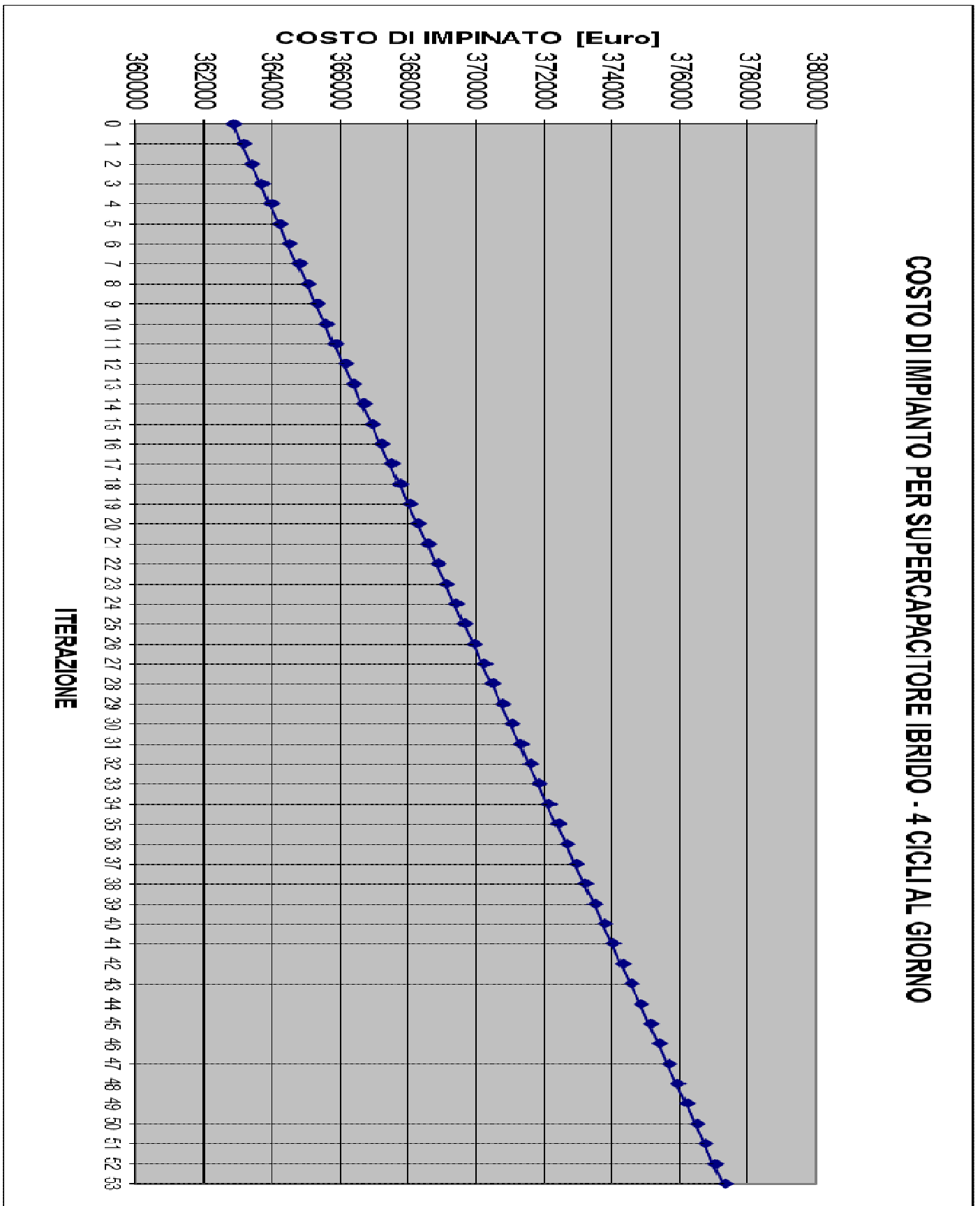


Fig 5.50 – Costi di esercizio supercapacitore ibrido compiendo 4 cicli al giorno

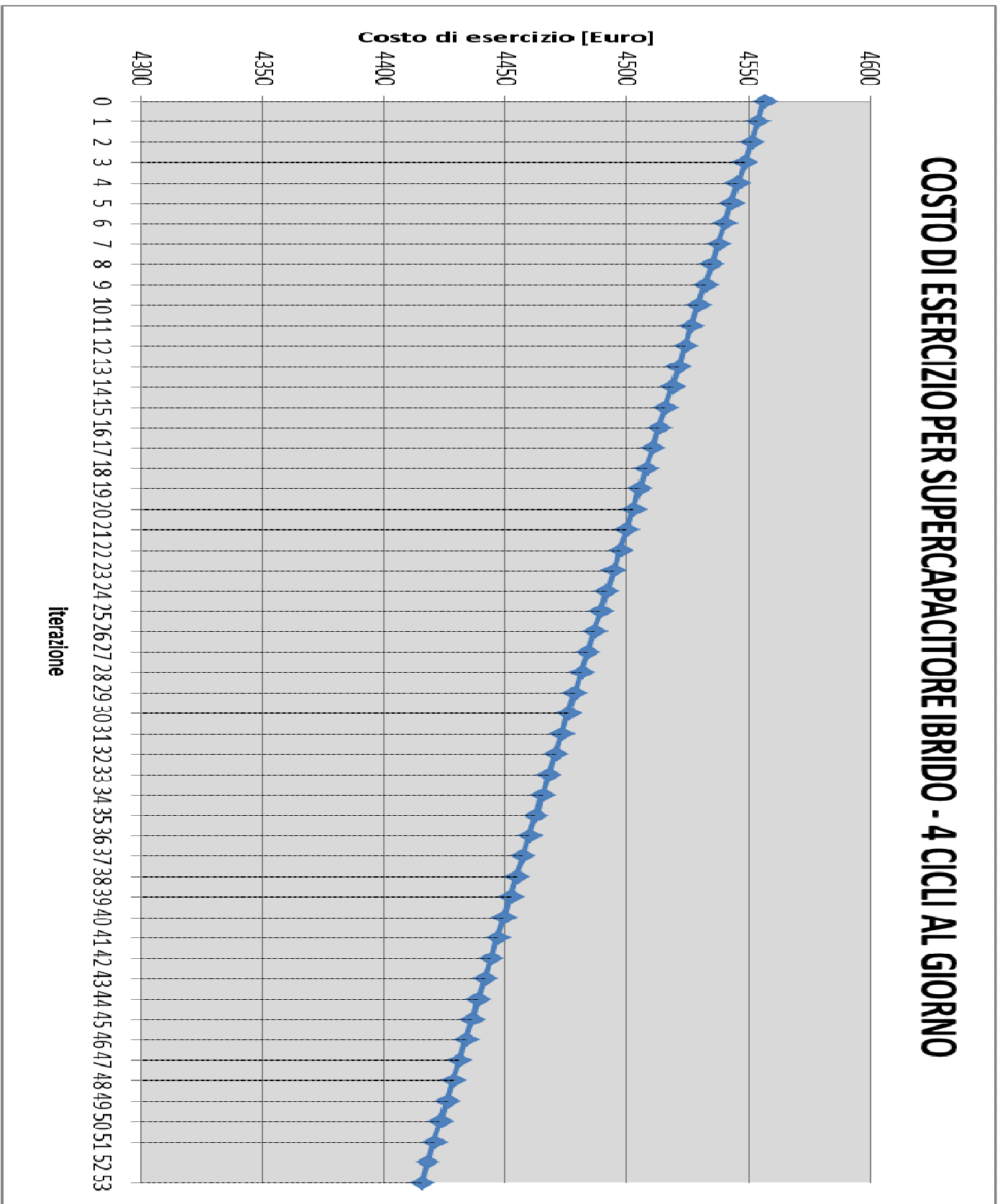




Fig 5.51– Costi totali supercapacitore ibrido compiendo 4 cicli al giorno

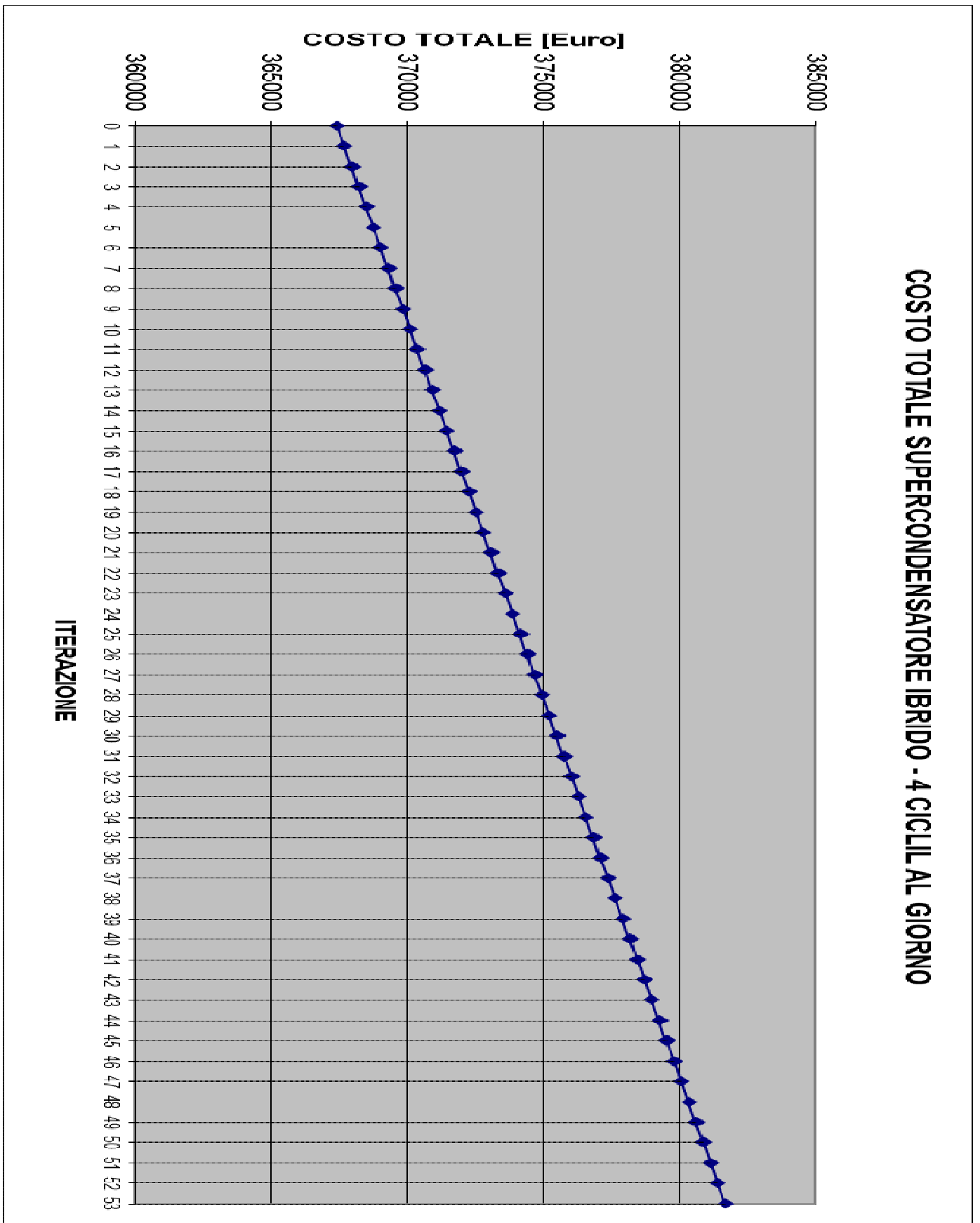
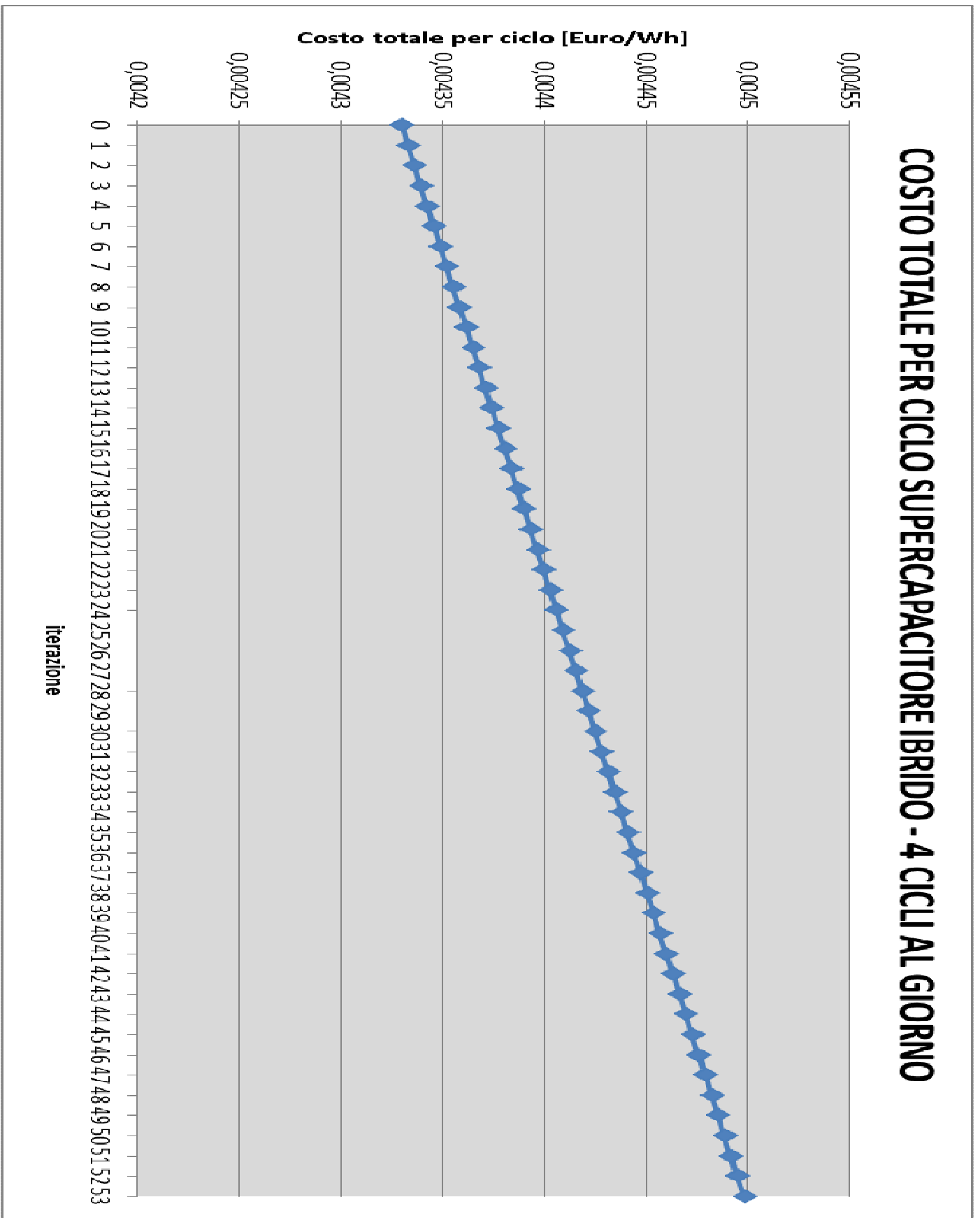


Fig 5.52– Costi totali per ciclo supercapacitore ibrido compiendo 4 cicli al giorno



## 6 CICLI AL GIORNO PER 20 ANNI PER UN TOTALE DI 43800 CICLI

N° ITERAZIONE	0	1	2	3
COSTO DEL CAPITALE [Euro]	362848	363120	363392	363664
COSTO DI ESERCIZIO [Euro]	6835,019429	6830,906411	6826,798	6822,694
POTENZA SPECIFICA DISPONIBILE [W/Kg]	959,5202399	958,8014981	958,0838	957,3672
ENERGIA SPECIFICA DISPONIBILE [Wh/Kg]	2,177491303	2,178873644	2,180254	2,181634
EFFICIENZA	0,680684411	0,680876561	0,681069	0,68126
DoD-DEPTH OF DISCHARGE %	100,0422271	99,90386694	99,76587	99,62823
NUMERO DI SOSTITUZIONI	0	0	0	0
NUMERO DI CICLI DI VITA	300100	299649	299206	298770
MASSA [Kg]	1334	1335	1336	1337
COSTO TOTALE [Euro]	369683,0194	369950,9064	370218,8	370486,7
COSTO TOTALE PER CICLO [Euro/Wh]	0,002904422	0,002906527	0,002909	0,002911

8	16	23	31	39	47	48	49	50	51
365024	367200	369104	371280	373456	375632	375904	376176	376448	376720
6802,24	6769,745	6741,542	6709,572	6677,877	6646,455	6642,546	6638,642	6634,741	6630,845
953,8003	948,1481	943,2572	937,7289	932,2651	926,8646	926,1939	925,5242	924,8555	924,1877
2,188506	2,199419	2,208887	2,219616	2,230248	2,240784	2,242094	2,243403	2,24471	2,246016
0,682216	0,683734	0,685051	0,686545	0,688026	0,689494	0,689676	0,689859	0,690041	0,690223
98,94536	97,87095	96,94875	95,91469	94,90127	93,90787	93,78508	93,66259	93,5404	93,41851
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
296697	293737	291495	289312	287515	286088	285935	285787	285645	285508
1342	1350	1357	1365	1373	1381	1382	1383	1384	1385
371826,2	373969,7	375845,5	377989,6	380133,9	382278,5	382546,5	382814,6	383082,7	383350,8
0,002921	0,002938	0,002953	0,00297	0,002987	0,003003	0,003005	0,003008	0,00301	0,003012

Fig 5.53– Costi di impianto supercapacitore ibrido compiendo 6 cicli al giorno

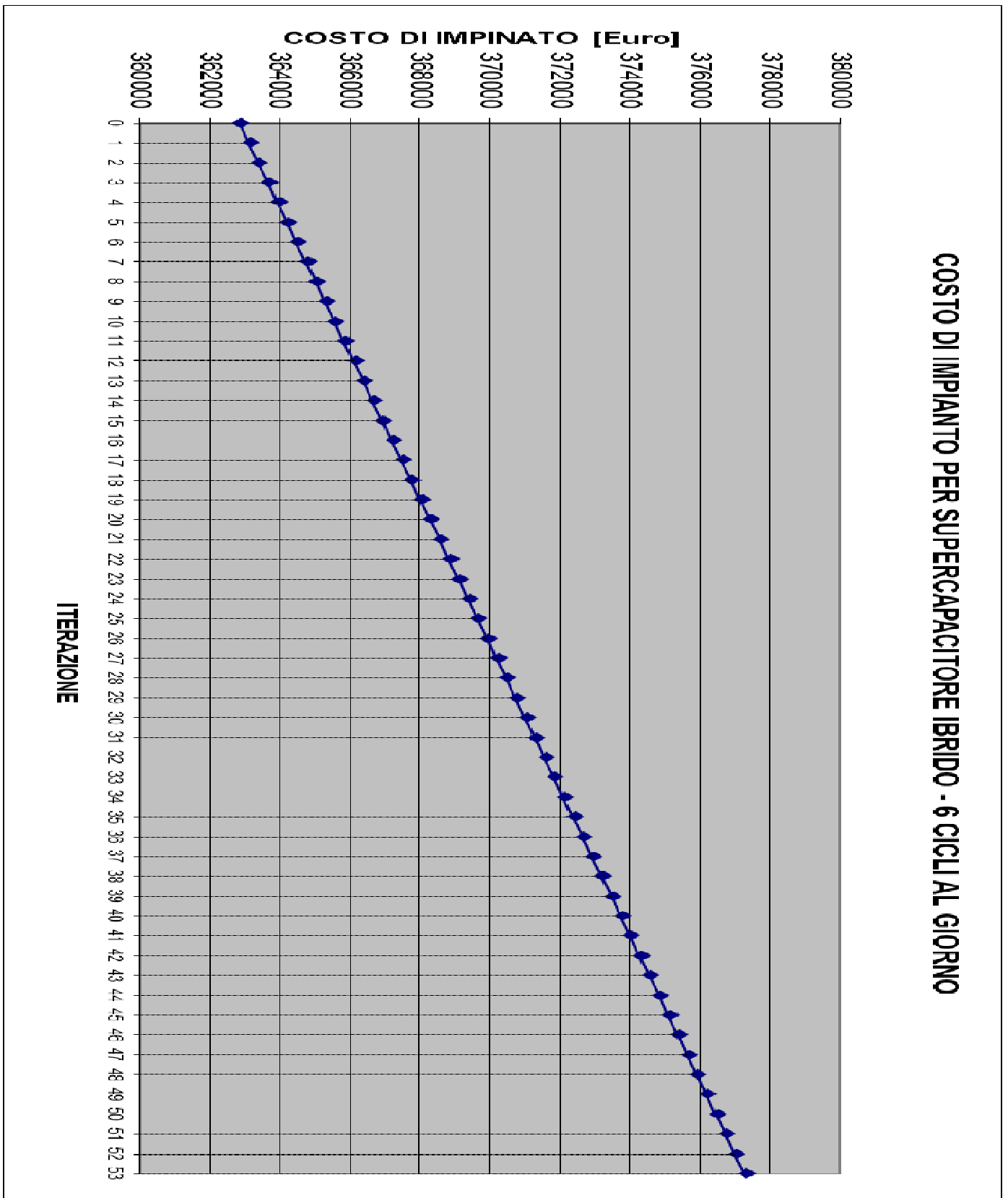


Fig 5.54– Costi di esercizio supercapacitore ibrido compiendo 6 cicli al giorno

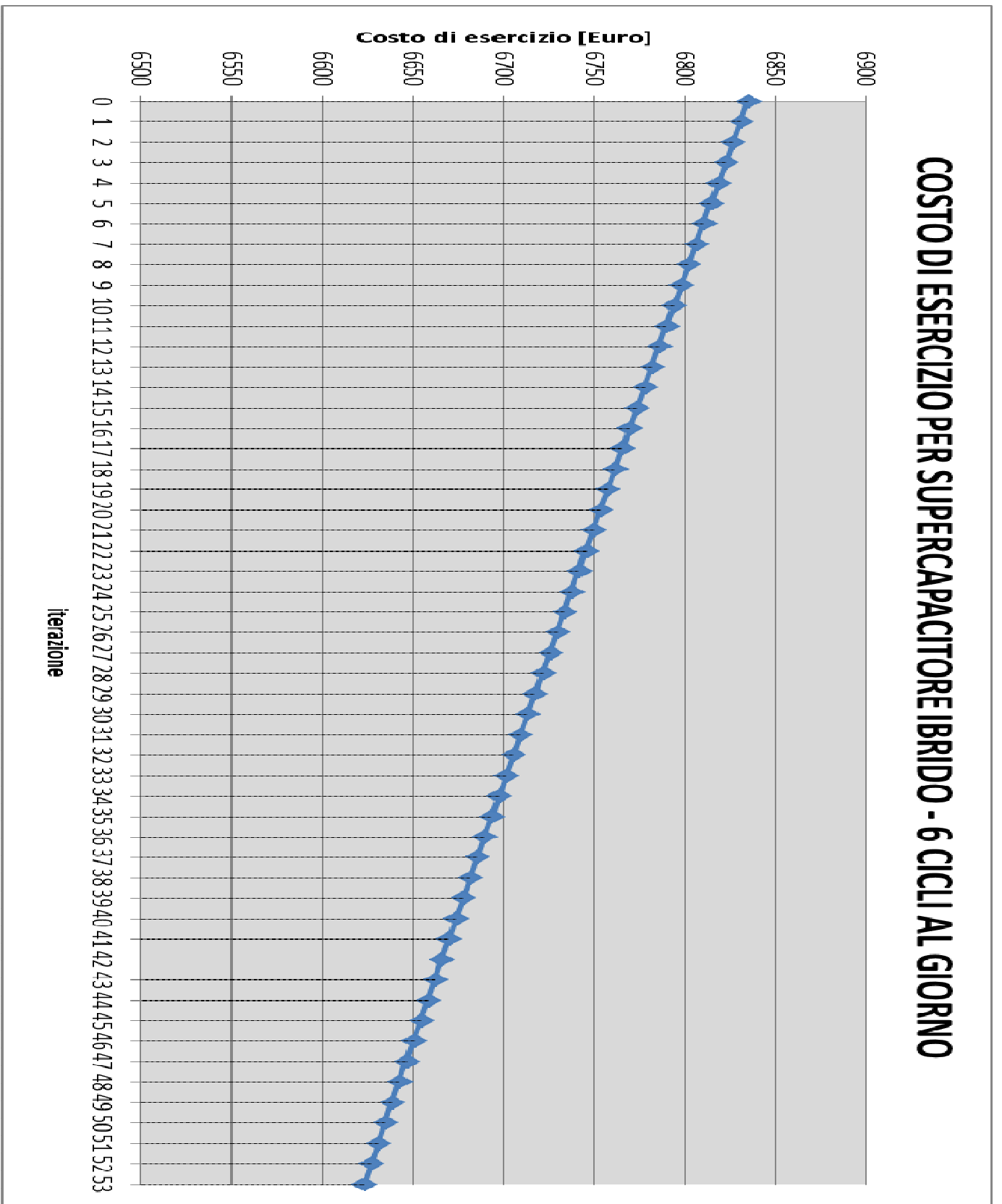


Fig 5.55– Costi totali supercapacitore ibrido compiendo 6 cicli al giorno

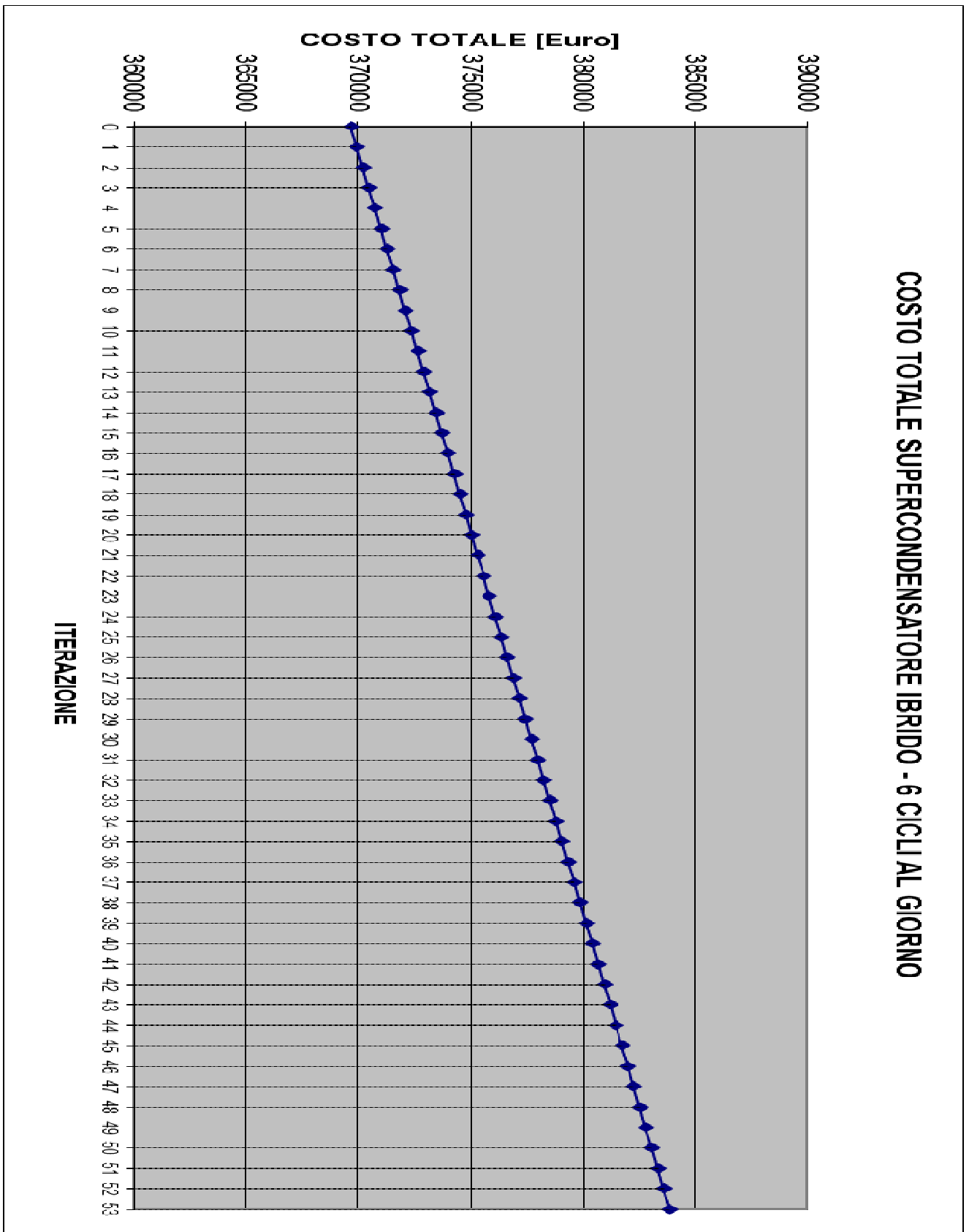
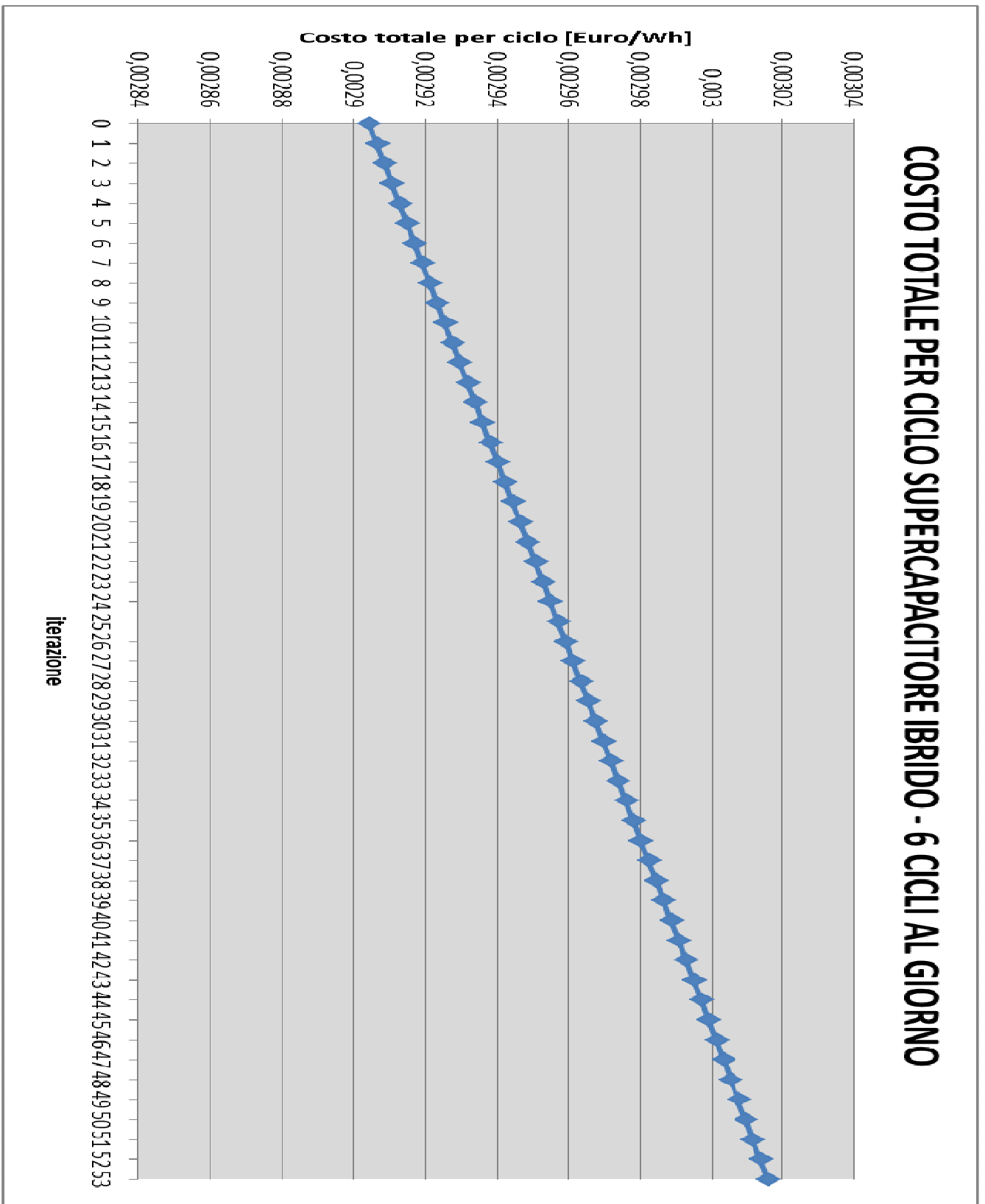


Fig 5.56 – Costi totali per ciclo supercapacitore ibrido compiendo 6 cicli al giorno



## SUPERCAPACITORE IBRIDO

### 8 CICLI AL GIORNO PER 20 ANNI PER UN TOTALE DI 58400 CICLI

N° ITERAZIONE		0
COSTO DEL CAPITALE [Euro]		362848
COSTO DI ESERCIZIO [Euro]		9113,359238
POTENZA SPECIFICA DISPONIBILE [W/Kg]		959,5202399
ENERGIA SPECIFICA DISPONIBILE [Wh/Kg]		2,177491303
EFFICIENZA		0,680684411
DoD-DEPTH OF DISCHARGE %		100,0422271
NUMERO DI SOSTITUZIONI		0
NUMERO DI CICLI DI VITA		300100
MASSA [Kg]		1334
COSTO TOTALE [Euro]		371961,3592
COSTO TOTALE PER CICLO [Euro/Wh]		0,002191742

### 10 CICLI AL GIORNO PER 20 ANNI PER UN TOTALE DI 73000 CICLI

N° ITERAZIONE		0
COSTO DEL CAPITALE [Euro]		362848
COSTO DI ESERCIZIO [Euro]		11391,69905
POTENZA SPECIFICA DISPONIBILE [W/Kg]		959,5202399
ENERGIA SPECIFICA DISPONIBILE [Wh/Kg]		2,177491303
EFFICIENZA		0,680684411
DoD-DEPTH OF DISCHARGE %		100,0422271
NUMERO DI SOSTITUZIONI		0
NUMERO DI CICLI DI VITA		300100
MASSA [Kg]		1334
COSTO TOTALE [Euro]		374239,699
COSTO TOTALE PER CICLO [Euro/Wh]		0,001764133



## **Osservazioni:**

Tutte le considerazioni generali fatte per la batteria agli ioni di litio valgono anche per i supercondensatori ibridi. I costi di esercizio per inefficienza sono sempre direttamente influenzati dal numero dei cicli totali (come si può vedere dall'equazione 3 dei costi di esercizio) . Si osserva che, in tutti i casi , ottengo sempre un numero di sostituzioni necessarie nullo già partendo con l'adoperare la massa minima necessaria per soddisfare le esigenze del ciclo(1334 kg ). Come già detto in precedenza, i casi in cui le sostituzioni sono pari a zero non devono essere prese in considerazione.

## Conclusioni al caso 2

Incrementando i cicli al giorno e confrontando le rispettive tabelle si può notare come tutti i costi crescono tranne i costi per ciclo ( i cicli totali stanno al denominatore). Aumentando i cicli da compiere durante la vita dell'impianto aumenta anche il numero delle sostituzioni necessarie e con esso i costi d'impianto della batteria (come si può intuire dall'equazione 2). I costi di esercizio per inefficienza sono, invece, direttamente influenzati dal numero dei cicli totali (come si può vedere dall'equazione 3). Confrontando le caratteristiche della batteria, per il medesimo numero d'iterazione, per i diversi casi (2,4,6 cicli al giorno), si può notare come la potenza, l' energia specifica ,il DoD, l' efficienza e il numero di cicli durante la vita della batteria rimangono uguali. Il numero dei cicli durante la vita della singola batteria non cambia perché questa è legata al DoD che viene ricavato solo da parametri energetici non influenzati dal numero dei cicli totali . Questi ultimi condizionano invece la durata vitale in anni della batteria che diminuisce con il crescere dei cicli che la singola batteria deve supportare e, di conseguenza, aumenta anche il numero delle sostituzioni necessarie per coprire tutta la durante vitale dell'impianto.

Una volta fatte queste considerazioni di carattere generale, si possono mettere a confronto le batterie per trarne alcune osservazioni . Qualora volessi adoperare la massa minima necessaria per soddisfare il fabbisogno del ciclo trovata nel caso 1 (474 kg per la batteria agli ioni di litio tipo A e 674 Kg per quella di tipo C) e compiere 4 cicli al giorno, occorrerebbe aumentare il numero delle sostituzioni e avrei bisogno di farne una nel caso della batteria di tipo C per un costo di 38987 euro e quattro (invece di due) per quella di tipo A per un costo di 42250 euro. Si rileva, inoltre che, la soluzione meno onerosa per la batteria di tipo C è quella che prevede di adoperare una massa di 675 kg tenendo conto di dover fare una sostituzione per un costo totale di 38771 euro (iterazione 1 del relativo caso).

La batteria agli ioni di litio LTO tipo A potrebbe sembrare a volte meno economicamente conveniente se non fosse che questa mi permette di risparmiare

adoperando, per esempio, una massa di 525 kg, tenendo conto di dover cambiare la batteria una sola volta e andando così a spendere 23139 euro (iterazione 51). Se volessi eseguire 6 cicli al giorno, la batteria di tipo A mi consentirebbe di utilizzare una massa di 565 kg, fare una sostituzione e sostenere un costo di 27304 euro (iterazione 91) che è inferiore a quello da sostenere nel caso meno oneroso per la batteria di tipo C (massa di 680 kg, una sostituzione necessaria, costo totale di 43875 euro, iterazione 6). Nel caso dei 6 cicli al giorno, si può osservare che, qualora volessi utilizzare la massa minima necessaria (474 kg per la batteria tipo A e 674 per quella tipo C), avrei bisogno di fare 6 sostituzioni per la batteria di tipo A contro una sostituzione per quella di tipo C, e sostenere un costo di 58986 euro per quella di tipo A contro i 43931 euro per quella di tipo C. Nel caso di 8 cicli al giorno, la batteria di tipo A mi permette di adoperare una massa di 605 kg, cambiare la batteria una volta, e spendere 31226 euro (iterazione 131) che è, ancora una volta, inferiore alla cifra che verrei a spendere per la soluzione meno onerosa per la batteria di tipo C (massa di 717 kg, una sostituzione necessaria, costo totale di 49052 euro, iterazione 43). Si può osservare che, volendo adoperare la massa minima necessaria, ho bisogno di fare 8 sostituzioni per la batteria di tipo A contro 2 sostituzioni per quella di tipo C, e sostenere un costo di 77429 euro per quella di tipo A contro i 62324 euro per quella di tipo C. Tutte le considerazioni fatte ci permettono di affermare che, dal punto di vista economico, andando oltre i due cicli al giorno, non è più conveniente utilizzare la massa minima necessaria per la batteria agli ioni di litio tipo A (come nel caso 1), poiché questo comporterebbe la necessità di cambiare la batteria troppe volte. La batteria di tipo A diventa più conveniente da tutti i punti di vista (massa e costo) solo quando raggiunge una massa tale da contenere il numero della sostituzione. Abbiamo detto che, nel caso dei 6 cicli al giorno, utilizzando la massa minima necessaria (474 kg per la batteria tipo A e 674 per quella tipo C), ho bisogno di fare 6 sostituzioni per la batteria di tipo A contro una sostituzione per quella di tipo C, e sostenere un costo di 58986 euro per quella di tipo A contro i 43931 euro per quella di tipo C. La batteria di tipo A è più costosa ma, aumentando man mano la massa, il numero dei

cambi da effettuare diminuiscono e , quando diventano pari a 3 (iterazione 30), la batteria diventa vantaggiosa anche dal punto di vista economico (40448 euro). L'analogo ragionamento vale anche per gli altri casi (4,6,8,10.. cicli al giorno) e ,analizzando le tabelle possiamo osservare che, a pari numero di cicli al giorno, la batteria di tipo A diventa meno onerosa (oltre ad avere meno massa) quando il numero delle sostituzioni diventa, aumentando man mano la massa, pari al doppio più uno di quelle ottenute per la batteria di tipo C quando , per quest'ultima, adopero la massa minima (674 kg) . Nel caso dei 10 cicli al giorno, infatti, la batteria di tipo C mi consente di risparmiare se decido di utilizzare la massa minima (674 kg) e accetto di sostituire la batteria 3 volte (iterazione 0), ma , se aumento la massa della batteria di tipo A in modo tale da aver bisogno di sostituirla solo 7 volte (iterazione 18), la situazione si capovolge. Dopo questa inversione di tendenza la batteria agli ioni di litio di tipo A risulta sempre la più conveniente. La batteria più costosa e quella che richiede più massa è sempre quella di tipo B che può essere presa in considerazione solo quando voglio compiere 8 cicli al giorno , infatti ,solo in questi casi, il numero dei cambi necessari è diverso da zero. I supercondensatori sono da scartare per tutti i casi esaminati poiché, per queste batterie, il sistema di dimensionamento e di valutazione economica utilizzato indica sempre l'assenza della necessità di fare sostituzioni. I supercondensatori , infatti , hanno un elevatissimo numero di cicli di vita (dai 300000 fino ai 10000000) ma hanno una durata vitale bassa per la nostra applicazione. Si può però analizzare qual è il tipo di supercondensatore più vantaggioso qualora volessi semplicemente cambiare il numero dei cicli al giorno agendo in un impianto di cui la durata vitale sia inferiore o uguale a quella stimata da un supercondensatore . Per il supercondensatore ibrido devo sempre adoperare la stessa massa (1334 kg) e i costi totali aumentano man mano che aumento il numero dei cicli soprattutto per il fatto che i costi di esercizio sono proporzionali al numero dei cicli totali. Rispetto al costo totale di 365126 euro con due cicli al giorno (caso 1), il costo totale aumenta di circa il 0,62 % nel caso dei 4 cicli al giorno, dell' 1,2 % nel caso dei 6 , dell' 1,8 % nel caso di 8 e del 2,3% nel caso dei 10 cicli al giorno.

Utilizzando il supercondensatore ibrido, quindi, ho sempre il vantaggio di adoperare sempre la stessa massa e, qualora volessi aumentare il numero dei cicli al giorno, ho la consapevolezza che il costo totale aumenta relativamente di poco. Per il supercondensatore, l'incremento dei costi all'aumentare dei cicli al giorno risulta maggiore rispetto a quello ottenuto per il supercondensatore ibrido. Si osserva, infatti, che, per il supercondensatore, rispetto al costo totale di 95996 euro con due cicli al giorno (caso 1), il costo totale aumenta di circa il 0,9 % nel caso dei 4 cicli al giorno, dell' 1,8 % nel caso dei 6 , del 2,7 % nel caso di 8 e del 3,6% nel caso dei 10 cicli al giorno. Il costo totale del supercondensatore è sempre comunque più conveniente rispetto a quello ibrido e, inoltre, mi permette di adoperare meno massa.



## Conclusioni

Questa tesi ha l'obiettivo di mostrare come la decisione di installare un tipo di batteria tra i vari tipi esistenti dipenda da vari fattori determinabili tramite un preciso metodo. Questi fattori sono termini che definiscono la batteria (la massa, il DoD, la sua durata vitale, l'efficienza) e i suoi costi totali dovuti sia alle caratteristiche della stessa sia alle eventuali sostituzioni future che si dovranno tenere in considerazione se si vuole coprire tutto l'arco vitale dell'applicazione in oggetto. Quindi, con l'ausilio di un diagramma che illustra tutti i passaggi che occorre fare per il raggiungimento dell'obiettivo e con l'ausilio di curve specifiche trovate in modo sperimentale che dovrebbero essere fornite dai costruttori, si possono ricavare tutti i parametri della batteria e il costo da sostenere nel momento in cui si procede con l'investimento pianificando una soluzione piuttosto che un'altra. La decisione di installare un tipo di batteria piuttosto che un altro dipende ovviamente dall'applicazione peculiare a cui esso è destinato, perciò si è preso come esempio l'installazione di un sistema di accumulo su un impianto navale in grado di fornire la dovuta potenza ed energia per far fronte all'azionamento di eliche direzionali, i thruster, che servono ad agevolare le manovre in fase di uscita o d'ingresso dal porto. Una volta definiti il fabbisogno energetico per ciascun ciclo di azionamento e le caratteristiche dell'impianto, si sono scelti i sistemi di accumulo più idonei ad essere adoperati per l'applicazione. Nello specifico, per il nostro sistema di dimensionamento e valutazione economica, si sono presi in considerazione una batteria agli ioni di litio titanite (LTO) chiamata per semplicità di tipo A, una agli ioni di litio manganese ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ -LMO) di tipo B, una agli ioni di litio ferro-fosfato ( $\text{LiFePO}_4$  o LFP) di tipo C, un tipico supercondensatore e un supercondensatore ibrido. I parametri utilizzati per questi sistemi di accumulo sono quelli riportati nell'articolo [1], presente nelle fonti bibliografiche, in cui vengono mostrate le caratteristiche delle batterie più comunemente utilizzate per il tipo di applicazioni navali. Il primo passo è stato quello determinare le masse minime necessarie per soddisfare i requisiti minimi del ciclo che sono eseguiti per

almeno due volte al giorno (un ingresso e un'uscita della nave dal porto) per un impianto dalla durata vitale di vent'anni. Una volta identificate le masse minime, si procede ad aumentare man mano la massa per vedere come questa influenza l'andamento dei costi e il numero di sostituzioni necessarie. Il numero delle sostituzioni necessarie, però, dipende ovviamente dalla durata vitale della batteria che è difficile da determinare realisticamente. Tutti i sistemi di accumulo, infatti, risentono di una perdita progressiva della capacità sia quando questa viene utilizzata sia quando questa viene conservata in scaffale (calendar life). Nel nostro caso studio, il nostro impianto ha una durata vitale di vent'anni ma, per lo stato della tecnica odierno, non ci sono batterie dotate di pari durata. Nella realtà, infatti, un sistema di accumulo ha una vita media di dieci anni quindi, nel caso del nostro impianto, dobbiamo scartare l'ipotesi di non dover fare sostituzioni. Teoricamente però, la durata vitale della batteria aumenta anche con l'aumentare della massa quindi, solo a livello teorico, può spingersi anche oltre i vent'anni. Si può concludere, infine, che, per la nostra applicazione, la scelta di adoperare un solo un sistema di accumulo per tutta la durata dell'impianto è teoricamente accettabile ma impossibile nella pratica e, quindi, da escludere. Analizzando i risultati ottenuti si è potuto affermare che scegliere la batteria, più adatta all'applicazione in esame e più economicamente conveniente, non è banale e che questa scelta dipende dalla massa utilizzate e dal numero di cicli che si vogliono effettuare al giorno. Nello specifico, si è potuto osservare, nel caso scegliesti di effettuare due cicli al giorno, come la soluzione meno onerosa, per la batteria agli ioni di litio di tipo A, non coincide con quella in cui si adopera la massa minima necessaria. Se si utilizzasse la massa minima necessaria, infatti, occorrerebbe fare troppe sostituzioni che portano ad aumentare la spesa. Nel caso ci fossero particolari condizioni per cui è necessario adoperare meno massa possibile, l'utilizzo della massa minima necessaria diviene, ovviamente, obbligatorio ma si verrebbe a pagare di più. Per tutte le altre batterie, nel caso dei due cicli al giorno, il sistema di dimensionamento e di valutazione economica utilizzato indica l'assenza della necessità di fare sostituzioni, quindi, queste batterie, non devono



essere presa in considerazione. Si può osservare, tuttavia, che i sistemi di accumulo agli ioni di litio lavorano tutte alla stessa efficienza (0,49-0,50) poiché hanno tutte una discreta potenza specifica. Le batterie che hanno un'elevata energia specifica ma bassa potenza specifica, non sono adatte in quanto la nostra applicazione richiede più potenza che energia. Si nota, infatti, che più è bassa la potenza specifica della batteria più è alta la massa minima necessaria (4264 kg per quella di tipo B, 674 kg per quella di tipo C, 474 kg per quella A) e il costo totale. Si rileva, infine, che più è bassa la potenza specifica del sistema di accumulo più è alto il DoD a cui si lavora (3-4% per quella di tipo B, 18-24 % per quella di tipo C, 64% per quella di tipo A). Incrementando i cicli al giorno, si può notare come tutti i costi crescono tranne i costi per ciclo (i cicli totali stanno al denominatore). Aumentando i cicli da compiere durante la vita dell'impianto aumenta anche il numero delle sostituzioni necessarie e con esso i costi d'impianto della batteria (come si può intuire dall'equazione 2). I costi di esercizio per inefficienza sono invece direttamente influenzati dal numero dei cicli totali (come si può vedere dall'equazione 3).

Andando oltre i due cicli al giorno, è stato possibile osservare che la scelta della batteria più conveniente diventa più difficile. La batteria di tipo A, per esempio, diventa più conveniente, rispetto alle altre, da tutti i punti di vista (massa e costo), solo quando raggiunge una massa tale da contenere il numero della sostituzione. La batteria più costosa e quella che richiede più massa è sempre quella di tipo B che può essere presa in considerazione solo quando voglio compiere più di 6 cicli al giorno, infatti, solo in questi casi, il numero dei cambi necessari è diverso da zero. I supercondensatori sono da scartare per tutti i casi esaminati. Si è potuto comunque osservare che l'incremento dei costi all'aumentare dei cicli al giorno per il supercondensatore risulta maggiore rispetto a quello per il supercondensatore ibrido. Il costo totale del supercondensatore è sempre comunque più conveniente rispetto a quello ibrido. Si può osservare, infine che, i supercondensatori (ibrido e non) lavorano con un DoD molto alto (95%) e con un'efficienza superiore a quella ottenuta per le batterie agli ioni di litio. In particolare, l'efficienza del supercondensatore è

superiore a quella del supercondensatore ibrido (0,88 contro lo 0,68) mentre la massa necessaria risulta inferiore. Consci di tutte queste considerazioni, è importante ricordare che le curve utilizzate per quest'analisi sono state ricavate per via sperimentale, i coefficienti adoperati nelle funzioni sono stati ottenuti tramite interpolazioni dei dati di catalogo forniti dai costruttori o riportati sugli articoli tecnici, e gli anni di vita dei sistemi di accumulo sono stati ricavati in modo approssimativo. Si conclude , quindi, che, se i costruttori fornissero regolarmente ,in modo più dettagliato, le caratteristiche e i comportamenti peculiari dei sistemi di accumulo, sarebbe possibile effettuare un miglior dimensionamento e una migliore valutazione economica .

# Fonti

- [1] V.Musolino, L.Piegari, E.Tironi, "Technical and Economical Evaluation of Storage Systems in Naval Applications", Dipartimento di Elettronica, Informatica e Biongegneria del Politecnico di Milano, pubblicato durante l'International Conference On Clean Power, ICCEP 2013, 11-13 Giugno, Alghero, Italia
- [2] M. Conte, G. Graditi, M.G. Ippolito, E. Riva Sanseverino, E. Telaretti, G. Zizzo, "Analisi e definizione di strategie di gestione e controllo di sistemi di accumulo elettrico per applicazioni in reti di distribuzione attive automatizzate Report 1 – Analisi dello stato dell'arte", Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Elettronica e delle Telecomunicazioni, Università degli Studi di Palermo, report pubblicato nel 2011 da Enea, Agenzia Nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile
- [3] Di Stefano Polesello, Andrea Polesello, Silvia Guenzi, Claudio Roscioli, " Strumenti per il laboratorio chimico-biologico, Volume 2", pubblicato il 10/2007, Editore: Tecniche Nuove
- [4] Randy B. Wright Chester G. Motloch " Calendar-Life Studies of Advanced Technology Development Program Gen 1 Lithium Ion Batteries " ,report pubblicato dallo U.S. Department of Energy Assistant Secretary for Energy Efficiency and Renewable Energy (EE) , Idaho Operation Office, Stato di Idaho, USA, Marzo 2001
- [5] Isidor Buchmann, presidente e fondatore di Cadex Electronics Inc., "How to store batteries", articolo pubblicato dal sito "<http://www.batteryuniversity.com>" gestito dal presidente della Cadex, Richmond (Vancouver), Canada, 2011
- [6] Jaffar, Maheran Mohd; International Society of Automation, " The net present value of mudharabah and musharakah models", pg. 30,34;pubblicato durante l' International Conference on Business, Engineering and Industrial Applications, ICBEIA 2011, ,5-7 Giugno, Kuala Lumpur, Malesia

- [7] Yabuta K., Matsushita T., Tsujikawa T., " Examination of the cycle life of valve regulated lead acid batteries", pg. 97,101; pubblicato durante il Telecommunications Energy Conference, INTELEC 2007, 30 Settembre – 4 Ottobre 2007, Roma, Italia
- [8] Guena T., Leblanc P., " How Depth of Discharge Affects the Cycle Life of Lithium-Metal-Polymer Batteries", pg.1,8; pubblicato durante il Telecommunications Energy Conference, INTELEC 2006, Settembre 2006, Providence, Stato del Rhode Island, USA
- [9] Riccardo Lazzari(RSE s.p.a.), Giovanni Manzini (RSE s.p.a.), Enrica Micolano(RSE s.p.a.), "Caratterizzazione, affidabilità, sicurezza e applicazioni di sistemi di accumulo per la generazione distribuita", rapporto pubblicato da Ricerca sul Sistema Energetico – RSE S.p.A., progetto Smart Grids, generazione distribuita, reti attive e sistema di accumulo, Referente: Luciano Martini (RSE s.p.a.)Gennaio 2013
- [10] E. Tironi, L. Piegari, V. Musolino. S. Grillo, "Studio di sistemi avanzati di accumulo di energia quali supercondensatori e sistemi di accumulo misti (batterie + supercondensatori)", Politecnico di Milano, report pubblicato da Enea, 2011

## Appendice

### Stesura del programma usato per i calcoli in linguaggio Visual Basic

Option Explicit

‘Apertura del programma “massa” per la valutazione dell’energia e della massa minima necessaria. I dati iniziali vengono scritti nelle celle apposite da cui la funzione prende il valore’

Sub massa()

‘Dichiarazione delle variabili’

Dim energciclo As Double, potciclo As Double, potspec As Double, potspecmax As Double, energspecmax As Double, massa As Double, massaincr As Double, energspec As Double, potspecpu As Double

Dim energspecpu As Double, energmin As Double, massarisul As Double, numcicli As Integer

‘Parametri del ciclo’

potciclo = Cells(5, 9).Value

energciclo = Cells(6, 9).Value

‘Dati specifici del sistema di accumulo scelto dal datasheet’

potspec = Cells(7, 9).Value

energspec = Cells(8, 9).Value

potspecmax = Cells(9, 9).Value

energspecmax = Cells(10, 9).Value

‘Numero di cicli totali del sistema di accumulo dal datasheet ‘

numcicli = Cells(11, 9).Value

massa = potciclo / potspec

Cells(13, 9).Value = massa

Cells(12, 9).Value = 0

Cells(14, 9).Value = 0

‘Blocco Do While per il calcolo della massa minima richiesta’

Do While (massa > 0)

potspec = potciclo / massa

potspecpu = potspec / potspecmax

energspecpu = 1.583 \* Exp(-0.8926 \* potspecpu) - 0.452

energspec = energspecpu \* energspecmax

massa = massa + 1

If (massa \* energspec > energciclo) Then  
Exit Do

End If  
Loop

massarisul = massa - 1

‘MsgBox è una funzione che visualizza un messaggio in una finestra di dialogo’

MsgBox ("la massa minima richiesta dal sistema di accumulo è [Kg] " & massarisul)

Cells(12, 9).Value = massarisul

energmin = (massarisul) \* energspec

MsgBox ("l'energia minima richiesta dal sistema di accumulo è [Wh] " & energmin)

Cells(14, 9).Value = energmin

End Sub

‘Apertura del programma “costi” per le valutazioni economiche’

Sub costi()

‘Dichiarazione variabili’

Dim costsistacc As Double, km As Double, costenerg As Double, energciclo As Double, potciclo As Double, lp As Double, cr As Double, dr As Double, nr As Double, ny As Double, massamin As Double

Dim potspecmax As Double, energspecmax As Double, massaincri As Double, i As Double, j As Double, potspeci As Double, potspecipu As Double, eff As Double, energspecipu As Double, energspeci As Double

Dim energi As Double, DoDi As Double, nc As Double, a As Integer, c As Integer, y As Integer, e As Integer, k As Integer, costocapitale As Double, x As Integer, costoesercizio As Double, d As Integer

Dim b As Integer, r As Integer, ncl As Double, effi As Double, nclpu As Double, numcicli As Double, numaxcicli As Integer, costocapitalerisul As Double, costoeserciziorisul As Double, f As Integer, g As Integer

Dim m As Integer, costototalerisul As Double

MsgBox ("Inserisci i parametri dell'impianto e le specifiche del sistema di accumulo")

costsistacc = Cells(21, 9).Value

‘Coefficiente di manutenzione km’

km = Cells(22, 9).Value

costenerg = Cells(23, 9).Value

‘Durata vitale dell'impianto lp’

lp = Cells(24, 9)

'Costo capitale cr'

cr = Cells(25, 9).Value

'Tasso di interesse dr'

dr = Cells(26, 9).Value

'Numero dei cicli totali da effettuare'

nc = Cells(27, 9).Value

' i valori inerenti alla batteria li prendo dalla prima parte del programma già che ci sono

'dati batteria

potciclo = Cells(5, 9).Value

energiciclo = Cells(6, 9).Value

potspecmax = Cells(9, 9).Value

energspecmax = Cells(10, 9).Value

massamin = CInt(Cells(12, 9).Value)

Cells(28, 9) = massamin

numcicli = Cells(11, 9).Value

,

i = 0

numaxcicli = InputBox("Inserire n° di cicli che si vuole analizzare, ogni iterazione corrisponde all'aumento della massa minima di un kilo")

MsgBox ("numero di cicli " & numaxcicli)



Cells(30, 9).Value = numaxcicli

m = 0

'blocco che mi serve per compilare le tabelle ed effettuare i cicli in automatico. Il numero dei cicli massimo è 270 ma solo per limiti di pagina'

Do While (m <= 270)

Cells(48, 8 + m).Value = 0

Cells(49, 8 + m).Value = 0

Cells(50, 8 + m).Value = 0

Cells(51, 8 + m).Value = 0

Cells(52, 8 + m).Value = 0

Cells(53, 8 + m).Value = 0

Cells(54, 8 + m).Value = 0

Cells(55, 8 + m).Value = 0

Cells(56, 8 + m).Value = 0

Cells(57, 8 + m).Value = 0

Cells(58, 8 + m).Value = 0

Cells(59, 8 + m).Value = 0

m = m + 1

Loop

Do While (i <= numaxcicli)

'istruzioni che servono per cancellare l'andamento dei costi di impianto ad ogni iterazione

f = 0

Do While (f <= nr)

f = f + 1

Cells(39, 7 + f).Value = 0

Loop

,

Cells(48, 7 + i).Value = i

massaincri = massamin + i

'istruzioni che servono per riportare i valori di output che mi possono interessare per ogni iterazione nella tabella'

Cells(58, 7 + i).Value = massaincri

potspeci = potciclo / massaincri

Cells(51, 7 + i).Value = potspeci

potspecipu = potspeci / potspecmax

,

'Calcolo efficienza'

$$\begin{aligned} \text{effi} = & (\text{potspecipu} - 0.2) * (\text{potspecipu} - 0.3) * (\text{potspecipu} - 0.5) * (\text{potspecipu} - 0.7) \\ & * (\text{potspecipu} - 0.9) * (\text{potspecipu} - 0.99) * (269.19) + (\text{potspecipu} - 0.1) * \\ & (\text{potspecipu} - 0.3) * (\text{potspecipu} - 0.5) * (\text{potspecipu} - 0.7) * (\text{potspecipu} - 0.9) * \\ & (\text{potspecipu} - 0.99) * (-1036.77) + (\text{potspecipu} - 0.1) * (\text{potspecipu} - 0.2) * \\ & (\text{potspecipu} - 0.5) * (\text{potspecipu} - 0.7) * (\text{potspecipu} - 0.9) * (\text{potspecipu} - 0.99) * \\ & (1207.73) + (\text{potspecipu} - 0.1) * (\text{potspecipu} - 0.2) * (\text{potspecipu} - 0.3) * (\text{potspecipu} \\ & - 0.7) * (\text{potspecipu} - 0.9) * (\text{potspecipu} - 0.99) * (-733.42) + (\text{potspecipu} - 0.1) * \\ & (\text{potspecipu} - 0.2) * (\text{potspecipu} - 0.3) * (\text{potspecipu} - 0.5) * (\text{potspecipu} - 0.9) * \\ & (\text{potspecipu} - 0.99) * (431.03) + (\text{potspecipu} - 0.1) * (\text{potspecipu} - 0.2) * (\text{potspecipu} \\ & - 0.3) * (\text{potspecipu} - 0.5) * (\text{potspecipu} - 0.7) * (\text{potspecipu} - 0.99) * (-219.08) + \\ & (\text{potspecipu} - 0.1) * (\text{potspecipu} - 0.2) * (\text{potspecipu} - 0.3) * (\text{potspecipu} - 0.5) * \\ & (\text{potspecipu} - 0.7) * (\text{potspecipu} - 0.9) * (80.59) \end{aligned}$$

'Calcolo energia sepcifica in p.u.

$$\text{energspecipu} = 1.583 * \text{Exp}(-0.8926 * \text{potspecipu}) - 0.452$$

$\text{energspeci} = \text{energspecipu} * \text{energspecmax}$

$\text{Cells}(52, 7 + i).\text{Value} = \text{energspeci}$

$\text{Cells}(53, 7 + i).\text{Value} = \text{effi}$

$\text{energi} = \text{massaincri} * \text{energspeci}$

$\text{DoDi} = (\text{energciclo} / \text{energi}) * 100$

$\text{Cells}(54, 7 + i).\text{Value} = \text{DoDi}$

‘Calcolo numero dei cicli effettuati dal sistema di accumulo in p.u.’

$\text{nclpu} = 24.08 * \text{Exp}(-0.04697 * \text{DoDi}) + 0.05155 * \text{Exp}(0.02717 * \text{DoDi})$

$\text{ncl} = \text{nclpu} * \text{numcicli}$

$\text{Cells}(57, 7 + i).\text{Value} = \text{ncl}$

$\text{nr} = (\text{nc} \setminus \text{ncl})$

$\text{Cells}(55, 7 + i).\text{Value} = \text{nr}$

$\text{ny} = \text{Int}(((\text{lp} / \text{nc}) * \text{ncl}))$

$\text{Cells}(56, 7 + i).\text{Value} = \text{ny}$

$c = 7$

$b = 0$

$k = 0$

If  $\text{nr} = 0$  Then  $k = 0$

$\text{costocapitale} = \text{costsistacc} * \text{massaincri} * \text{energspecmax} * \text{km} * (((1 + \text{cr}) ^ (\text{ny} * k)) / ((1 + \text{dr}) ^ (k * \text{ny})))$

$\text{Cells}(39, 8).\text{Value} = \text{costocapitale}$

Do While (k <= nr)

costocapitale = costsistacc \* massaincri \* energspecmax \* km \* (((1 + cr) ^ (ny \* k)) / ((1 + dr) ^ (k \* ny)))

k = k + 1

b = c + 1

c = b

Cells(39, b).Value = costocapitale

Loop

e = 7

d = 0

x = 0

Do While (x < lp)

costoesercizio = costenerg \* energciclo \* (1 - effi) \* ((nc \* ((1 + cr) ^ x) / (lp \* ((1 + dr) ^ x))))

x = x + 1

d = e + 1

e = d

Cells(40, d).Value = costoesercizio

Loop

'istruzioni per riportare nella tabella i costi ad ogni iterazione

costocapitalerisul = Cells(42, 7).Value

Cells(49, 7 + i) = costocapitalerisul

costoeserciziorisul = Cells(43, 7).Value

Cells(50, 7 + i).Value = costoeserciziorisul

costototalerisul = Cells(44, 7).Value

Cells(59, 7 + i).Value = costototalerisul

Cells(60, 7 + i).Value = costototalerisul / (nc \* energciclo)

i = i + 1

Loop

MsgBox ("Fine del programma")

End Sub

