



**Politecnico
di Torino**

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea in Ingegneria Elettrica

Tesi di Laurea Magistrale

Sistemi di accumulo ibridi per applicazioni marittime

Relatori

Prof. Michele Angelo Pastorelli
PhD Fabio Mandrile
Prof. Salvatore Musumeci

Candidato

Emanuele Candeloto

Settembre 2022

Sommario

Per avere uno sviluppo sempre più sostenibile, i trasporti navali devono avere come obiettivo la riduzione di combustibili fossili che comporta quindi una diminuzione delle emissioni di CO_2 e del riscaldamento globale. Il tutto dovrà avvenire tramite l'elettificazione della propulsione dei trasporti marittimi.

Questa tesi tratta della possibilità di utilizzo e dimensionamento, secondo il costo ottimale, di un sistema di accumulo ibrido *HESS* con i relativi convertitori per avere un'elettificazione completa senza l'uso di motori a combustione interna.

Il sistema *HESS* si basa sull'utilizzo di due o più tipologie di batterie: le più comuni sono quelle ad alta energia *HE* e quelle ad alta potenza *HP*. La prima serve a far fronte a profili di carico con bassi picchi di potenza, la seconda invece è utilizzata per sopperire ai picchi di potenza del profilo di carico.

La combinazione di batterie *HE* e *HP* può essere realizzata mediante diverse configurazioni della tipologia *HESS*, quella trattata sarà quella con convertitori in cascata a entrambe le batterie.

Inoltre sono stati dimensionati i convertitori tenendo conto delle richieste del carico, dei datasheet dei moduli di potenza forniti dai costruttori e delle perdite.

Ringraziamenti

Alla fine si è giunti alla fine anche di questo percorso che spero possa servire per interfacciarmi in maniera pronta ed efficace col mondo del lavoro.

Un ruolo fondamentale fino a qui è stato svolto dalla mia mamma e dal mio papà che non mi hanno fatto mai mancare nulla per tutti questi anni e nei momenti difficili mi hanno sempre dato una buona parola ed *aiutato*.

Ringrazio Lavinia che per 5 anni è stata a fianco me incoraggiandomi a portare a termine i miei obiettivi e a fare delle scelte coerenti.

Ringrazio i miei parenti ed anche chi purtroppo non può più essere qui per vedermi.

Ringrazio le *collaborazioni* ed i sorrisi avuti con i compagni di scuola, in particolare del mio vicino di banco Lorenzo Olivero e dei miei amici da una vita Lorenzo Vignale e Paolo Provera.

Infine un ringraziamento speciale a Fabio Mandrile che con costanza mi ha seguito nella stesura della tesi, dandomi sempre un pronto supporto come non avrei mai immaginato.

A Mamma e Papà

Indice

Elenco delle tabelle	VIII
Elenco delle figure	IX
1 Introduzione	1
2 Sistemi di accumulo	5
2.1 Batterie	5
2.1.1 Batterie al Litio	7
2.1.2 Supercondensatori	9
2.1.3 Celle a combustibile	9
2.2 Tecnologia ibrida di accumulo dell'energia HESS	10
3 Dati e requisiti di progetto	13
3.1 Metodologia di dimensionamento	14
4 Implementazione della gestione dell'energia	19
4.1 Gestione dell'energia	19
4.2 Altri metodi di gestione della potenza di ricarica	23
5 Risultati e discussione	25
5.1 Peschereccio tipo 1	26
5.1.1 Priorità di ricarica verso la batteria HE	27
5.1.2 Priorità di ricarica verso la batteria HP	31
5.2 Confronto dei risultati di Peschereccio tipo 1 con gli altri profili di carico	36
5.2.1 Peschereccio tipo 2	36
5.2.2 Rimorchiatore	38
5.2.3 Traghetto tipo 1	40
5.2.4 Traghetto tipo 2	42
5.2.5 Battello	43
5.3 Analisi in base alle oscillazioni di costo delle batterie	43

6	Progettazione del convertitore	47
6.1	Introduzione teorica	47
6.1.1	Logica di controllo	52
6.1.2	Dissipazione negli interruttori di potenza	53
6.1.3	Modellistica dei dissipatori	55
6.2	Modellizzazione del convertitore	56
6.2.1	Utilizzo del modulo a IGBT	59
6.2.2	Utilizzo del modulo con MOSFET in tecnologia SiC	65
6.2.3	Riepilogo e confronti	70
7	Modello finale del sistema batteria e convertitore	75
8	Conclusioni	81
	Bibliografia	83

Elenco delle tabelle

2.1	Caratteristiche tecniche dei sistemi di accumulo [2–6].	6
2.2	Confronto tra tecnologie di differenti batterie [2].	7
2.3	Configurazioni dei sistemi di accumulo dell'energia.	11
3.1	Specifiche delle celle HE, HP e convertitore [1].	14
3.2	Parametri di invecchiamento della batteria HE e HP.	15
5.1	Dati profilo di carico del peschereccio tipo 1.	26
5.2	Risultati numerici principali del peschereccio tipo 1.	27
5.3	Riassunto dei profili di carico.	36
6.1	Dati di riferimento per la progettazione dei convertitori.	57
6.2	Caratteristiche principali del modulo Infineon FZ2400R17HP4-B29. . .	60
6.3	Caratteristiche principali del modulo Wolfspeed CAB650M17HM3. . .	66
6.4	Dati riepilogativi dalle simulazioni.	70
7.1	Caratteristiche principali delle celle scelte	76

Elenco delle figure

1.1	Maturità dei diversi sistemi di accumulo di energia [2–4].	2
1.2	Efficienza dei diversi sistemi di accumulo di energia [2–4].	2
2.1	Tecnologie dei sistemi di accumulo.	5
2.2	Cella a combustibile.	9
2.3	Confronto tra diverse tecnologie di accumulo dell’energia [2].	10
2.4	Esempio di profilo carico [18].	11
2.5	Modalità operativa della tecnologia <i>HESS</i> [18].	12
3.1	Numero dei cicli di vita in funzione del DOD.	15
3.2	Metodo per ricavare il DOD partendo dal numero di cicli.	16
4.1	Diagramma di flusso per il dimensionamento a minor costo.	20
4.2	Diagramma di flusso per la gestione dell’energia attraverso HE e HP. . .	21
4.3	Confronto del profilo di carico con la potenza massima di rigenerazione HE.	22
4.4	Confronto della potenza residua da assegnare ad HP con il suo limite di potenza di rigenerazione.	22
4.5	Confronto della potenza residua da assegnare ad HP con il suo limite di potenza di rigenerazione.	24
4.6	Confronto della potenza residua da assegnare ad HP con il suo limite di potenza di rigenerazione.	24
5.1	Profilo di carico del peschereccio di tipo 1.	26
5.2	Profilo costi in funzione della potenza massima di rigenerazione lato HE.	27
5.3	Energie minime da installare sulla batteria HE in funzione della sua potenza massima.	28
5.4	Energie minime da installare sulla batteria HP in funzione della sua potenza massima.	28
5.5	Andamento dei costi in funzione della P_{soglia}	29
5.6	Andamento dei pesi in funzione della P_{soglia}	30
5.7	Profilo di potenza della batteria HE e HP.	30
5.8	Profilo di energia dalla batteria HE e HP.	31
5.9	Andamento del <i>SOC</i> nel tempo.	31
5.10	Profilo costi in funzione della potenza massima di rigenerazione lato HE.	32

5.11	Energie minime da installare sulla batteria HE in funzione della sua potenza massima.	32
5.12	Energie minime da installare sulla batteria HP in funzione della sua potenza massima.	33
5.13	Andamento dei costi in funzione della P_{soglia}	33
5.14	Andamento dei pesi in funzione della P_{soglia}	34
5.15	Profilo di potenza dalla batteria HE e HP.	34
5.16	Profilo di energia dalla batteria HE e HP.	35
5.17	Andamento del SOC nel tempo.	35
5.18	Profilo di carico del peschereccio di tipo 2.	37
5.19	Profilo di potenza dalla batteria HE e HP con priorità di ricarica verso HE.	37
5.20	Profilo di potenza dalla batteria HE e HP con priorità di ricarica verso HP.	38
5.21	Profilo di carico del rimorchiatore.	38
5.22	Profilo di potenza dalla batteria HE e HP.	39
5.23	Profilo costi in funzione della potenza massima di rigenerazione lato HE.	39
5.24	Profilo di carico del traghetto tipo 1.	40
5.25	Energie minime da installare sulla batteria HE in funzione della sua potenza massima.	40
5.26	Energie minime da installare sulla batteria HP in funzione della sua potenza massima.	41
5.27	Profilo di potenza dalla batteria HE e HP.	41
5.28	Profilo di carico del traghetto tipo 2.	42
5.29	Energie minime da installare sulla batteria HE in funzione della sua potenza massima.	42
5.30	Profilo di carico del battello.	43
5.31	Costi minimi in funzione della variazione del costo unitario delle batterie.	44
5.32	Costi finali in funzione della variazione di prezzo unitario delle batterie.	44
6.1	Schema del convertitore DC-DC boost a 1 quadrante.	47
6.2	Forme d'onda principali.	48
6.3	Schema elettrico del convertitore DC-DC bidirezionale.	49
6.4	Schema modalità operativa buck.	50
6.5	Schema modalità operativa boost.	51
6.6	Sistema del controllo di corrente del convertitore.	52
6.7	Transitorio di turn-on dell'interruttore.	53
6.8	Transitorio di turn-off dell'interruttore.	54
6.9	Diagramma delle perdite nell'interruttore.	55
6.10	Schema del dissipatore termico.	55
6.11	Equivalente elettrico del circuito termico.	56
6.12	Configurazione dei convertitori DC-DC.	57
6.13	Dissipatore termico del convertitore.	58
6.14	Caratteristiche del glicole etilenico nel dissipatore.	58
6.15	Modello elettrico e termico del convertitore utilizzato.	59

6.16	Schema elettrico del modulo Infineon FZ2400R17HP4-B29.	60
6.17	Caratteristica di uscita dell'IGBT e diodo.	61
6.18	Caratteristica delle perdite per commutazione di IGBT e diodo.	61
6.19	Corrente nell'induttanza nel tempo.	62
6.20	Ripple di corrente su più induttanze in funzione della frequenza.	63
6.21	Temperatura di giunzione in funzione della frequenza.	63
6.22	Mappa di rendimento del convertitore per la batteria HE.	64
6.23	Corrente nell'induttanza nel tempo.	65
6.24	Mappa di rendimento del convertitore per la batteria HP.	65
6.25	Schema elettrico del modulo Wolfspeed CAB650M17HM3.	66
6.26	Caratteristica di uscita del MOSFET.	67
6.27	Caratteristiche di perdita del MOSFET e diodo.	67
6.28	Tensione e corrente nell'induttanza nel tempo.	68
6.29	Mappa di rendimento del convertitore per la batteria HE.	68
6.30	Corrente nell'induttanza nel tempo.	69
6.31	Mappa di rendimento del convertitore per la batteria HP.	69
6.32	Confronto dei rendimenti dei transistor analizzati per il convertitore del sistema HE.	71
6.33	Confronto dei rendimenti dei transistor analizzati per il convertitore del sistema HP.	71
6.34	Temperatura dei transistor analizzati in funzione della frequenza di commutazione.	72
6.35	Ripple di corrente in funzione della frequenza di commutazione.	73
6.36	Ripple di corrente in funzione della frequenza di commutazione.	74
7.1	Schema Simulink del sistema batteria e convertitore	75
7.2	Profilo di potenza dei pacchi batterie	76
7.3	Andamento della tensione di uscita dalle batterie	77
7.4	Andamento della correnti nelle batterie	77
7.5	Andamento della correnti sul carico	78
7.6	Andamento delle perdite nelle batterie	78
7.7	Andamento delle perdite nel convertitore	79
7.8	Andamento del SOC delle batterie	79
7.9	Rendimento globale e dei sistemi HE e HP	80

Capitolo 1

Introduzione

Una crescente domanda di grandi navi per il trasporto di merci, da crociera e per la difesa ha stimolato un'enorme ricerca e sviluppo per fornire una maggiore efficienza del carburante e meno inquinamento atmosferico. Attualmente la ricerca ha portato allo sviluppo delle odierne piccole navi completamente elettriche e grandi navi ibride.

Queste imbarcazioni includono navi della Marina Militare, navi nei settori dell'energia e dei trasporti, navi da crociera per passeggeri e piccole imbarcazioni da diporto.

Le attuali attività di ricerca e sviluppo si concentrano anche sulle combinazioni fattibili ed economiche di fonti di energia elettrica alternative, sull'uso delle onde oceaniche per generare energia, sul cablaggio di sistemi solari e celle a combustibile, sull'uso del combustibile GNL e sull'incorporazione dei sistemi di accumulo dell'energia delle batterie e dei relativi apparati di ricarica.

La propulsione elettrica si è rivelata una soluzione per migliorare l'efficienza del carburante e ridurre l'inquinamento per soddisfare le normative emergenti in materia di emissioni di NO_x e SO_x [1].

Gli ultimi 10 anni hanno visto una rapida espansione dei tipi di navi a propulsione elettrica.

Il sistema di propulsione della nave ha subito modifiche graduali, dalle apparecchiature meccaniche ad accoppiamento diretto al sistema di azionamento elettrico attualmente utilizzato, per esempio nelle navi portacontainer. L'applicazione di successo dei sistemi di propulsione elettrica è stata adottata da tutti gli altri tipi di imbarcazione, grazie alla ricerca e allo sviluppo dell'elettronica di potenza, protezione, controllo ed affidabilità del sistema di alimentazione ed efficienza del sistema di distribuzione in tensione continua.

I sistemi diesel-elettrici convenzionali, i sistemi ibridi con accumulo di energia a bordo e quelli completamente elettrici sono i principali sistemi per applicazioni marittime.

Un sistema di accumulo di energia comprende un pacco batterie, un convertitore di potenza ed il relativo controllo. I dispositivi di accumulo di energia sono costituiti da batterie secondarie, volani, condensatori, superconduttori, sistemi di accumulo di energia magnetica, celle a combustibile; questi dispositivi differiscono tra loro in termini di velocità di carica e scarica, cicli di vita, energia e densità di potenza, efficienza.

La maturità dei diversi sistemi di accumulo di energia è illustrata nella Figura 1.1, suddivisa in tre categorie: tecnologie mature, sviluppate e in via di sviluppo.

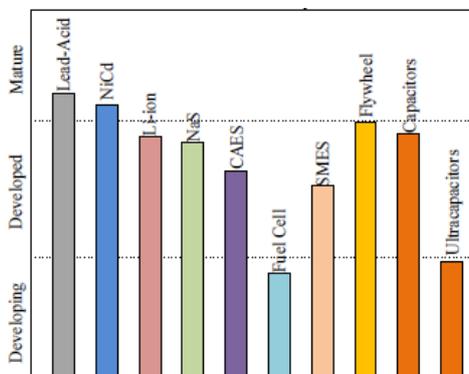


Figura 1.1: Maturità dei diversi sistemi di accumulo di energia [2–4].

L'efficienza, cioè il rapporto tra l'energia in uscita e quella in ingresso, delle diverse tecnologie di accumulo dell'energia sono illustrate nella Figura 1.2, la cella a combustibile è ancora in fase di sviluppo per immagazzinare idrogeno, questione chiave di questa tecnologia.

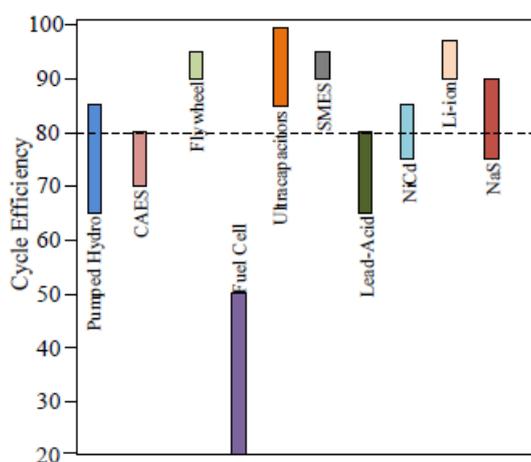


Figura 1.2: Efficienza dei diversi sistemi di accumulo di energia [2–4].

Il presente lavoro tratta le soluzioni completamente elettriche a batteria grazie allo sviluppo nel settore delle batterie agli ioni di litio, come l'aumento della densità energetica e la riduzione dei costi.

Nel Capitolo 2 si introducono le varie tecnologie utilizzate per i sistemi di accumulo, confrontando vantaggi e svantaggi di ogni tipologia. Una volta scelta la tecnologia da adottare, si va a presentare nel Capitolo 3 la metodologia di dimensionamento di un sistema di accumulo, analizzando la tecnologia ibrida, detta anche *HESS* e perché, in

determinate condizioni, potrebbe essere meglio di un sistema monotipo.

Successivamente, nel Capitolo 4 si va ad implementare il metodo di dimensionamento della batteria scelto e la gestione dell'energia derivata dalla ricarica e dalla rigenerazione; si giunge ad una soluzione attraverso le simulazioni, tramite il programma Matlab, che hanno come ingresso 6 cicli di potenza relativi ad applicazioni marittime differenti che verranno analizzati e confrontati nel Capitolo 5 insieme ad un'ulteriore analisi sulla variazione del costo a kWh delle batterie.

Dopo aver trovato i migliori profili di potenza, in base ai costi, delle batterie si è andati a dimensionare nel Capitolo 6 i componenti dei relativi convertitori, portando come esempio il profilo di carico del Peschereccio di tipo 1; dapprima si è utilizzato un modulo con IGBT e successivamente con MOSFET in tecnologia SiC, confrontando le loro mappe di perdita utilizzando l'applicativo Plecs.

In conclusione, nel Capitolo 7, è stata effettuata una simulazione tramite Simulink del sistema batteria e convertitore, andando a visualizzare gli andamenti di tensione, corrente e rendimenti.

Capitolo 2

Sistemi di accumulo

Come detto al Capitolo 1, la propulsione elettrica ha avuto una rapida espansione che perciò richiede sistemi di accumulo diversi a seconda delle esigenze e quindi sono disponibili differenti tecnologie; queste sono mostrate in Figura 2.1 dove la tipologia di accumulo è espressa in funzione della densità di potenza e di energia.

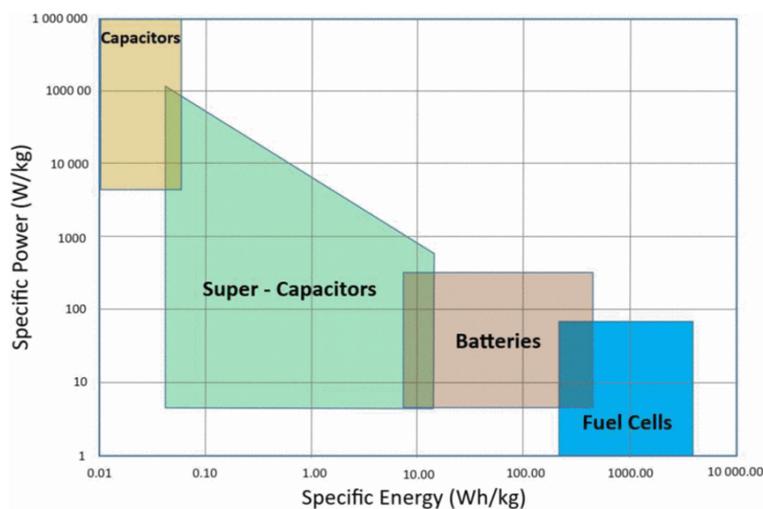


Figura 2.1: Tecnologie dei sistemi di accumulo.

2.1 Batterie

Le batterie sono dispositivi che trasformano l'energia chimica direttamente in energia elettrica attraverso una reazione elettrochimica di ossido-riduzione e sono classificate in tipi primari e secondari. Il primo non può essere caricato elettricamente mentre il secondo sì.

L'aumento della domanda di energia e potenza si traduce in una grande richiesta di

batterie in grado di produrre più densità di energia rispetto alle batterie di uso comune, al piombo. Queste sono quelle composte da idruro metallico di nichel (NiMH) e ioni di litio.

La Tabella 2.1 mostra i diversi tipi di sistemi di accumulo di energia con la loro densità di potenza, densità di energia, costo, efficienza e durata, mentre la Tabella 2.2 confronta diverse tecnologie di accumulo di energia adatte alle navi marittime. Si può notare che batterie al piombo, NiCd, NaS e gli ioni di litio sono dispositivi a densità di energia più elevata, mentre il volano ed il supercondensatore sono dispositivi con più elevata densità di potenza.

Tabella 2.1: Caratteristiche tecniche dei sistemi di accumulo [2–6].

Sistema	Densità di potenza [kW/kg]	Densità di energia [kWh/kg]	\$/kW	Efficienza [%]	Tempo di vita [anni]	Tempo di risposta
Piombo	75-300	30-50	300-600	65-80	3-15	ms
NiCd	150-300	50-75	500-1500	75-85	5-20	ms
NaS	150-230	150-240	1000-3000	75-90	10-15	ms
Li-ion	150-315	75-200	1200-4000	90-97	5-10	ms-s
Celle a combustibile	500+	800-10.000	10.000+	20-50	10-30	ms-min
SMES*	500-2000	0.5-5	200-300	90-95	20+	ms
Volano	400-1500	10-30	250-350	90-95	15-20	ms-s
Supercondensatori	100.000+	20+	100-300	85-98	4-12	ms

*Superconducting Magnetic Energy Storage

Tabella 2.2: Confronto tra tecnologie di differenti batterie [2].

Tipo di batteria	Vantaggi	Svantaggi
Piombo	<ul style="list-style-type: none"> - Economico - Il piombo è facilmente riciclabile - Ha bassa autoscarica tra 2% e 5% al mese circa da 30 a 50 kWh/kg 	<ul style="list-style-type: none"> - Ciclo di vita breve (circa 1500 cicli) - La durata del ciclo è influenzata dalla profondità di carica - Bassa densità di energia
Nickel Cadmio	<ul style="list-style-type: none"> - Alta densità di energia tra 50 e 75 kWh/kg) - Numero di cicli elevato tra 1500 e 3000 cicli 	<ul style="list-style-type: none"> - Alto degrado - Costo elevato - Tossicità del metallo Cadmio
Solfuro di Sodio	<ul style="list-style-type: none"> - Elevata densità di energia tra 150 e 240 kWh/kg - Nessuna autoscarica - Nessun degrado per la profondità di carica - Alta efficienza (75-90%) 	<ul style="list-style-type: none"> - Temperatura della batteria viene mantenuta tra 300 °C e 350 °C - Il ciclo di vita si riduce grazie alla profondità di scarica
Ioni di Litio	<ul style="list-style-type: none"> - Efficienza molto elevata tra 90% e 97% - Autoscarica molto bassa da 1% a 3% al mese - Bassa manutenzione 	<ul style="list-style-type: none"> - Costo molto elevato - Ha bisogno di un circuito di protezione da sovraccarico

2.1.1 Batterie al Litio

Le batterie agli ioni di litio hanno avuto maggiore importanza dall'inizio del 2000. Il livello di tensione nominale di ciascuna cella è di circa 3.7 V rispetto a 1.2 V nel caso di batterie NiCd. Un altro vantaggio è la maggiore densità di energia e potenza rispetto alle batterie NiCd e al piombo.

L'ostacolo principale nell'utilizzarle è il costo elevato, superiore a 600 \$/kWh dovuto al circuito di protezione da sovraccarico e del suo imballaggio particolare.

Inoltre, l'efficienza di queste batterie è nell'intervallo del 95-98% e la durata è di circa 5000 cicli.

La sicurezza è un altro grave problema nelle batterie agli ioni di litio poiché la maggior parte degli elettrodi di ossido di metallo sono instabili e possono decomporsi a temperature elevate. Quindi, per far fronte a questa situazione, le batterie sono dotate di un'unità di gestione tale da evitare sia una scarica sia una carica eccessiva.

Attualmente i più comuni tipi di batterie agli ioni di litio sono:

- Litio di ossido di cobalto ($LiCoO_2$): alta densità di energia, ma non utilizzata nell'industria marittima a causa della sua breve vita in cicli e potenza limitata;
- Litio al fosfato di ferro ($LiFePO_4$): il principale vantaggio di questa composizione è il catodo più stabile, riducendo il rischio di una fuga termica. Ha minore densità di energia, ma maggiore vita e un miglior tasso di carica rispetto a $LiCoO_2$;
- Litio nichel manganese ossido di cobalto ($LiNiMnCoO_2$) detto anche *NMC*: è preferita per veicoli elettrici e nell'industria marittima poiché il suo ciclo di vita è più lungo dei precedenti mentre la densità di energia è soddisfacente;
- Litio di ossido di manganese ($LiMn_2O_4$): offre un tasso di ricarica elevato e stabilità termica, a costo di una minore capacità energetica rispetto a $LiCoO_2$ e un ciclo di vita ridotto;
- Ossido di titanato di litio (Li_2TiO_3) detto anche *LTO*: sostituisce nell'anodo la grafite presente nella tipica batteria agli ioni di litio; la tensione di cella è di 2.4 V, può essere sottoposta a ricarica rapida per il suo elevato C_{rate} e ha una maggiore vita utile; inoltre ha una superficie anodica 30 volte maggiore alla classica batteria al litio e permette fino a 20.000 cicli di ricarica, ma i cambiamenti di temperatura e capacità influenzano notevolmente le prestazioni di questa tipologia di batteria.

Ogni tipo di cella fornisce una specifica tensione a circuito aperto (*OCV*) che varia con lo stato di carica (*SOC*). La correlazione tra *OCV* e *SOC* è caratteristica per ogni tipo di cella ed è anche un parametro importante per la caratterizzazione della cella ed il calcolo del *SOC* durante il funzionamento.

A seconda del tipo, le celle agli ioni di litio hanno un *OCV* compreso tra 3.2 e 3.9 V. In confronto, le batterie al piombo hanno le celle della batteria ad una tensione *OCV* di 2.1 V.

Il degrado di una batteria agli ioni di litio è governato principalmente da due fattori:

- La temperatura e la natura del caricamento ciclico della batteria;
- la temperatura alla quale è mantenuta la batteria influenza il suo degrado con il tempo, indicato come effetto calendario.

Per la cella ottimale la temperatura deve essere nel range da 15 a 30°C.

Elevate variazioni del *SOC*, ovvero la ricarica a un livello molto alto o la scarica a un livello molto basso aumenterà il tasso di invecchiamento della batteria. Generalmente sono impostati dei limiti operativi massimi e minimi di carica (ad esempio tra il 10 e 90% dello stato di carica), per batterie di grandi dimensioni che richiedono una lunga durata in modo da evitare che la batteria sia completamente carica o scarica (stato di carica dal 100% allo 0%).

Anche le elevate velocità di carica o scarica portano all'invecchiamento precoce della batteria.

Nel settore marittimo lo standard di vita delle batterie è di 10 anni. Ciò implica prevedere la sostituzione del pacco batteria a metà della vita, se la vita della nave è di 20-25 anni.

2.1.2 Supercondensatori

I condensatori immagazzinano energia in termini di campo elettrico e generalmente sono noti per le loro elevate velocità di carica e scarica simmetriche. Di solito, i condensatori hanno resistenze in serie equivalenti piuttosto basse che consentono di fornire la potenza in modo efficiente. Sono generalmente utilizzati in applicazioni in cui è richiesta una potenza maggiore per brevi periodi di tempo.

Le caratteristiche dei supercondensatori sono una maggiore densità di potenza, carica e scarica veloci grazie alla bassa resistenza interna, ciclo di vita elevato, bassa tensione e costo al Wattora più alto (fino a 20 volte rispetto alle batterie agli ioni di litio) [7].

Uno dei principali inconvenienti di questi ESS è l'elevata sensibilità alla sovratensione e, quindi, al sovraccarico. Altri inconvenienti includono una densità di energia relativamente bassa, una tensione di scarica lineare, un'elevata autoscarica e una bassa tensione di cella.

2.1.3 Celle a combustibile

La cella a combustibile trasforma l'energia chimica direttamente in energia elettrica, la sua struttura individuale viene mostrata in Figura 2.2:

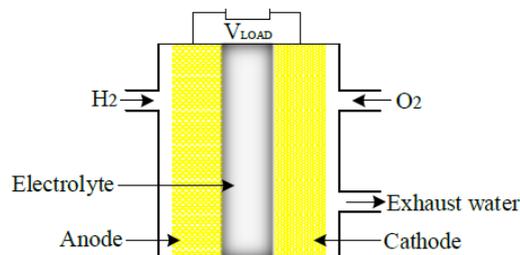


Figura 2.2: Cella a combustibile.

La cella a combustibile viene alimentata senza interruzione con un sistema esterno, utilizzando combustibili liquidi gassosi come idrogeno, idrazina o idrocarburi; l'ossidante è ossigeno gassoso o aria.

E' più efficiente energeticamente in quanto produce emissioni inferiori o nulle rispetto ad una tradizionale turbina a gas e ad un motore a combustione interna ma lo stoccaggio e la distribuzione dell'idrogeno sono le principali sfide per un suo uso più ampio, poiché è difficile immagazzinare idrogeno a una densità di energia paragonabile a combustibili a base di idrocarburi come il gas naturale liquido (GNL) o il gasolio marino (MDO) [2].

2.2 Tecnologia ibrida di accumulo dell'energia HESS

L'Hybrid Energy Storage System (HESS) è una combinazione di accumulo di energia con tecnologie diverse per quanto riguarda la capacità energetica, la durata del ciclo, la velocità di ricarica e scarica, densità di energia e potenza, velocità di risposta e durata di conservazione. La Figura 2.3 illustra il confronto tra densità di energia e densità di potenza di diverse tecnologie di accumulo:

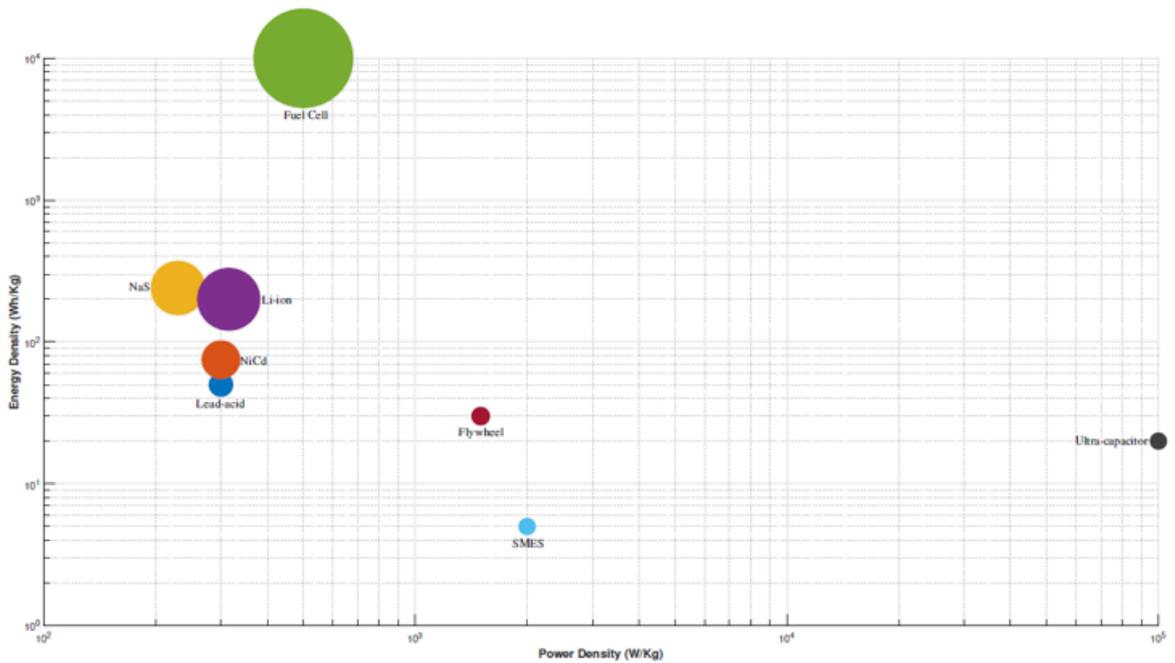


Figura 2.3: Confronto tra diverse tecnologie di accumulo dell'energia [2].

Si osserva che la tecnologia delle batterie può essere impiegata in entrambe le categorie a causa della loro ampia gamma di caratteristiche.

Quindi, le tecnologie di *ESS* possono essere classificate in alta energia (*HE*) ed alta potenza (*HP*). In questo modo, i dispositivi ad alta energia forniranno energia a lungo termine, mentre i dispositivi di potenza più elevata soddisferanno una breve durata ma esigenze di alimentazione più elevate.

Le possibili combinazioni sono illustrate alla Tabella 2.3:

Tabella 2.3: Configurazioni dei sistemi di accumulo dell'energia.

Batteria	Supercondensatore	[8, 9]
	SMES	[10]
	Volano	[11, 12]
	Batteria	-
Cella a combustibile	Volano	-
	SMES	[13]
	Supercondensatore	[14]
	Batteria	[15]
CAES (Compressed Air Energy Storage)	Volano	[16]
	SMES	-
	Supercondensatore	[17]
	Batteria	-

Attualmente, la tecnologia *HESS* ha utilizzato batterie agli ioni di litio per *HE* e *HP*, gestite tramite il Battery Manage System (*BMS*), per soddisfare carichi variabili in navi elettriche che si trovano su rotte di lunghezza fino a 25 km. Pertanto questa tecnologia è utile nel ridurre le dimensioni ed il numero dei generatori per far fronte a carichi variabili, radandone i picchi o livellando i carichi, di conseguenza riducendo le emissioni, il consumo di carburante, l'usura e strappi ai motori.

Le due batterie hanno potenze di picco differenti: una fa fronte a una parte della richiesta di carico, l'altra alla differenza tra il picco della richiesta di carico e la potenza erogata dalla prima batteria, come mostrato in Figura 2.5; invece la Figura 2.4 mostra quanto detto prima in termini energetici.

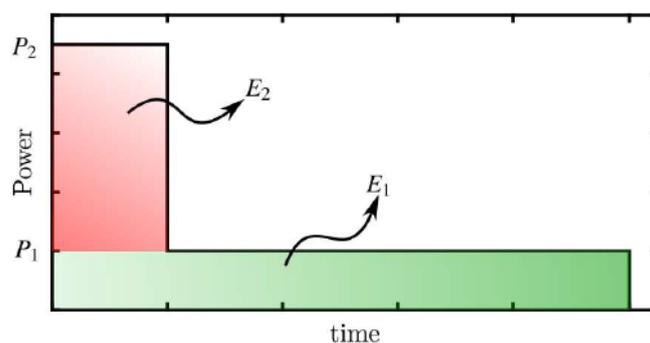
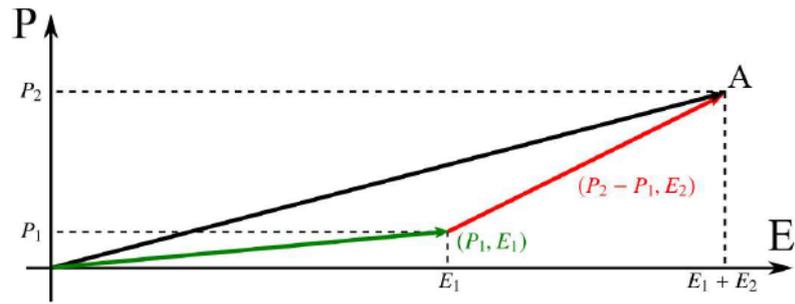


Figura 2.4: Esempio di profilo carico [18].

Figura 2.5: Modalità operativa della tecnologia *HESS* [18].

Perciò attraverso la combinazione dei due pacchi batteria si può riuscire a ridurre i costi e l'ingombro, visto che non è necessario avere in simultanea una batteria ad elevata potenza ed energia.

Capitolo 3

Dati e requisiti di progetto

Il dimensionamento del pacco batteria è definito considerando i requisiti principali elencati:

- Potenza massima di carica e scarica rispetto al profilo di carico fornito e la loro durata nel tempo;
- energia minima immagazzinata per garantire il ciclo tra due ricariche parziali o complete e la fornitura di energia utilizzabile con un SOC tra 10% e 90%;
- numero di cicli operativi di carica e scarica per avere una durata della batteria di 10 anni, prendendo uno stato di salute della batteria del 80% come fine vita;
- realizzazione dell'integrazione elettrica della batteria di bordo attraverso una tensione sul bus DC fissa a 1000 V.

Per rispettare il profilo di carico con un unico tipo di batteria porterebbe al suo sovradimensionamento o per il valore di potenza massimo o per il valore di energia immagazzinata; visto che sovente la potenza massima potrebbe avvenire in periodi di tempo limitati durante il ciclo di lavoro, per ridurre il sovradimensionamento, quindi i costi, viene utilizzata una soluzione ibrida detta *HESS* (Hybrid Energy Storage System) composta spesso da due pacchi batteria, uno ad alta energia *HE* e uno ad alta potenza *HP*.

3.1 Metodologia di dimensionamento

Le proprietà delle due tipologie di batterie sono elencate in Tabella 3.1:

Tabella 3.1: Specifiche delle celle HE, HP e convertitore [1].

Parametro	Cella HE	Cella HP
Tecnologia	NMC	LTO
Capacità [Ah]	50	23
Tensione nominale [V]	3.65	2.30
Resistenza interna [$m\Omega$]	0.9	0.7
C-rate carica/scarica	1/1	4/4
Densità di energia [Wh/kg]	206	96
Peso [kg]	0.885	0.550
Costo batteria [€/kWh]	150	380
Costo DC/DC [€/kW]	85	85

Il degrado delle batterie è caratterizzato dall'invecchiamento dovuto ai cicli ed all'età. In questa tesi si prende in considerazione solo quello dovuto ai cicli di lavoro della batteria. Il numero di cicli N_c che essa può subire prima di raggiungere il fine vita è dato dalla seguente formula [19]:

$$N_c = a \cdot e^{b \cdot DOD} + c \cdot e^{d \cdot DOD} \quad (3.1)$$

Dove:

- DOD è la profondità di scarica, definito come rapporto tra energia utilizzata ed installata:

$$DOD = \frac{E_{ut}}{E_{inst}} \quad (3.2)$$

Il complementare del DOD è il SOC , una misura relativa della quantità di energia immagazzinata, è il rapporto tra la quantità di carica della cella in un determinato istante e la capacità totale installata:

$$SOC = \frac{E_{residua}}{E_{inst}} \quad (3.3)$$

$$SOC = 1 - DOD \quad (3.4)$$

- a , b , c e d sono parametri caratteristici della batteria forniti dal costruttore; determinano l'andamento del numero di cicli di vita in funzione del DOD.

Tabella 3.2: Parametri di invecchiamento della batteria HE e HP.

Parametro	Cella HE	Cella HP
a	652200	6050000
b	-0.1683	-0.1761
c	48560	347800
d	-0.0341	-0.03807

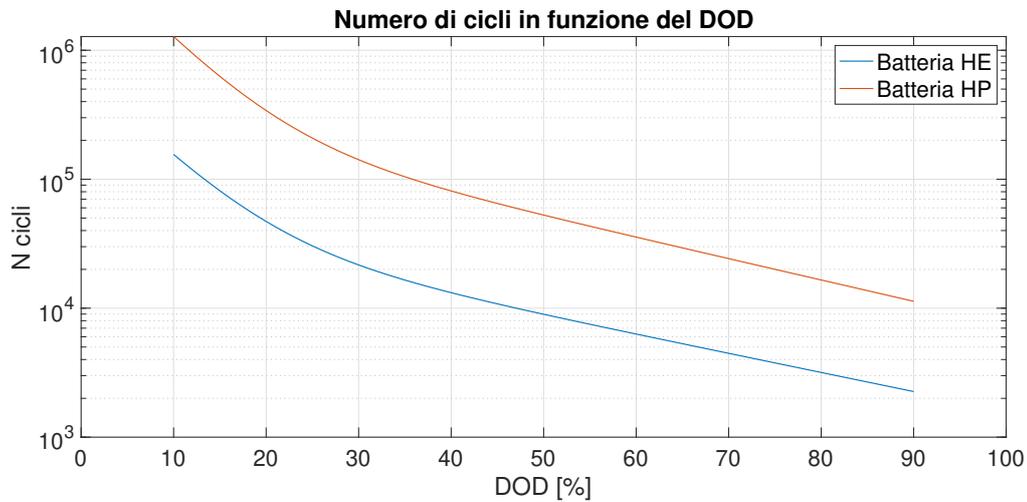


Figura 3.1: Numero dei cicli di vita in funzione del DOD.

La Figura 3.1 illustra le curve del numero di cicli che la batteria può subire prima di raggiungere il fine vita rispetto alla profondità di scarica delle due tipologie di batterie. Ora si esamina la metodologia per trovare la dimensione ottimale del sistema di accumulo ibrido *HESS* che porta ad avere il costo minimo: il principio si basa sulla conservazione dell'energia; la relazione tra la potenza dei pacchi batteria e la potenza del profilo di carico è la seguente:

$$P_{HE}(t) + P_{HP}(t) = P_d(t) \quad (3.5)$$

Dove $P_{HE}(t)$ e $P_{HP}(t)$ sono relativamente la potenza erogata da *HE* e *HP* mentre $P_d(t)$ è la potenza richiesta dal carico. Viene considerata potenza positiva durante la scarica delle batterie e negativa durante il processo di carica.

L'energia utilizzata dai sistemi di accumulo è calcolata secondo la formula:

$$E_{ut} = \int P_{sc}(t) dt \quad (3.6)$$

Dove $P_{sc}(t)$ è la potenza di scarica del pacco batteria e dt è il passo temporale. Considerando uno stato di salute (SOH) dell'80% come fine vita ed assumendo un degrado nel tempo uniforme, la percentuale della capacità di perdita (C_{loss}) può essere calcolato come:

$$C_{loss} = \frac{N_{prog}}{N_c} \cdot 20\% \quad (3.7)$$

Dove N_{prog} è il numero di cicli che la batteria dovrà fare nei 10 anni per cui è stata progettata.

Devono essere soddisfatti 4 criteri per trovare l'energia installata nei sistemi di accumulo HE e HP che garantisca:

1. Un numero di cicli necessari per raggiungere il fine vita, considerando il numero di cicli di progetto, maggiori di quelli di vita, attraverso il grafico in Figura 3.2 (rappresentazione grafica dell'Equazione 3.1) si ricava il DOD da cui l'energia minima da installare E_{inst1} :

$$E_{inst1} = \frac{E_{ut}}{DOD} \quad (3.8)$$

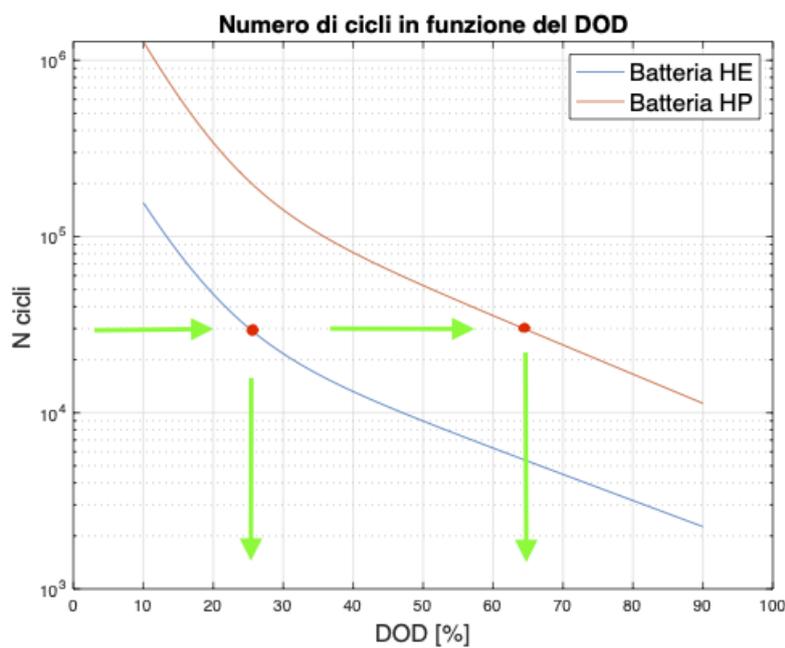


Figura 3.2: Metodo per ricavare il DOD partendo dal numero di cicli.

Conosciuto il numero di cicli si ricava il DOD tramite interpolazione lineare;

2. la fornitura di energia utilizzabile E_{inst2} mentre il SOC si mantiene tra il 10% e 90%, quindi soddisfare la seguente equazione:

$$E_{inst2} - C_{loss} \cdot E_{inst2} = \frac{E_{ut}}{0.8} \quad (3.9)$$

3. una corrente in ingresso alle celle HE e HP durante il processo di carica che non superi la corrente di carica massima della cella indicata in Tabella 3.1:

$$E_{inst3} = \frac{P_{carica} \cdot Cap_{cell}}{I_{carica}} = \frac{P_{carica} \cdot Cap_{cell}}{Cap_{cell} \cdot C_{rate,carica}} \quad (3.10)$$

Dove:

- P_{carica} è la potenza di carica di HE e HP ;
- Cap_{cell} è la capacità della batteria;
- I_{carica} è la corrente massima di carica della cella.

4. una corrente di uscita dalla cella HE e HP che durante il processo di scarica non superi la corrente di scarica massima della cella indicata in Tabella 3.1:

$$E_{inst4} = \frac{P_{scarica} \cdot Cap_{cell}}{I_{scarica}} = \frac{P_{scarica} \cdot Cap_{cell}}{Cap_{cell} \cdot C_{rate,scarica}} \quad (3.11)$$

Dove:

- $P_{scarica}$ è la potenza di scarica dei profili di carico del pacco batteria HE e HP ;
- $I_{scarica}$ è la corrente di scarica della cella della batteria HE e HP .

Infine, l'energia minima da installare sia per il sistema HE sia HP , pur soddisfacendo tutti i criteri di cui sopra, si calcola come:

$$E_{inst} = \text{Max}(E_{inst1}, E_{inst2}, E_{inst3}, E_{inst4}) \quad (3.12)$$

ed il costo totale del sistema $HESS$ comprensivo del convertitore è:

$$Costo_{tot} = E_{inst,HE} \cdot Costo_{HE} + E_{inst,HP} \cdot Costo_{HP} + (P_{max,HE} + P_{max,HP}) \cdot Costo_{DC/DC} \quad (3.13)$$

$$Costo_{tot} = Costo_{HESS} + Costo_{conv} \quad (3.14)$$

Dove:

$$Costo_{HESS} = E_{inst,HE} \cdot Costo_{HE} + E_{inst,HP} \cdot Costo_{HP} \quad (3.15)$$

$$Costo_{conv} = P_{max,HE} \cdot Costo_{DC/DC} + P_{max,HP} \cdot Costo_{DC/DC} = P_{max,scarica} \cdot Costo_{DC/DC} \quad (3.16)$$

Capitolo 4

Implementazione della gestione dell'energia

In questo capitolo viene utilizzato un metodo di gestione dell'energia richiesta basato sulla condivisione dell'alimentazione tra i pacchi batteria *HE* e *HP* tenendo conto della ricarica e rigenerazione durante il ciclo e della potenza massima di carica e scarica delle batterie.

4.1 Gestione dell'energia

Il sistema *HE* è considerato la principale fonte di energia da fornire alla nave. A tal proposito, la potenza di soglia $P_{max,HE}$ è definita come la potenza massima che essa possa alimentare.

Finché la potenza richiesta dall'imbarcazione è inferiore alla soglia di potenza definita, è solo la batteria *HE* che fornisce la potenza richiesta. Quando la questa supera la soglia, la potenza aggiuntiva viene erogata anche dal sistema *HP*; la Figura 4.1 mostra la gestione dell'energia, basata sulle regole definite dall'*HESS*.

Il diagramma di flusso di Figura 4.2 mostra il dimensionamento per i valori di potenza di soglia $P_{max,HE}$, partendo da 0 fino a raggiungere il valore massimo del profilo di carico attraverso degli intervalli d'incremento definiti, tenendo conto della potenza di rigenerazione massima e dello stato di carica delle batterie *HE* e *HP*. Per ogni valore della potenza di soglia viene calcolato il costo totale del pacco batteria, ricavando infine il costo minimo e di conseguenza la configurazione ottimale dell'*HESS* corrispondente.

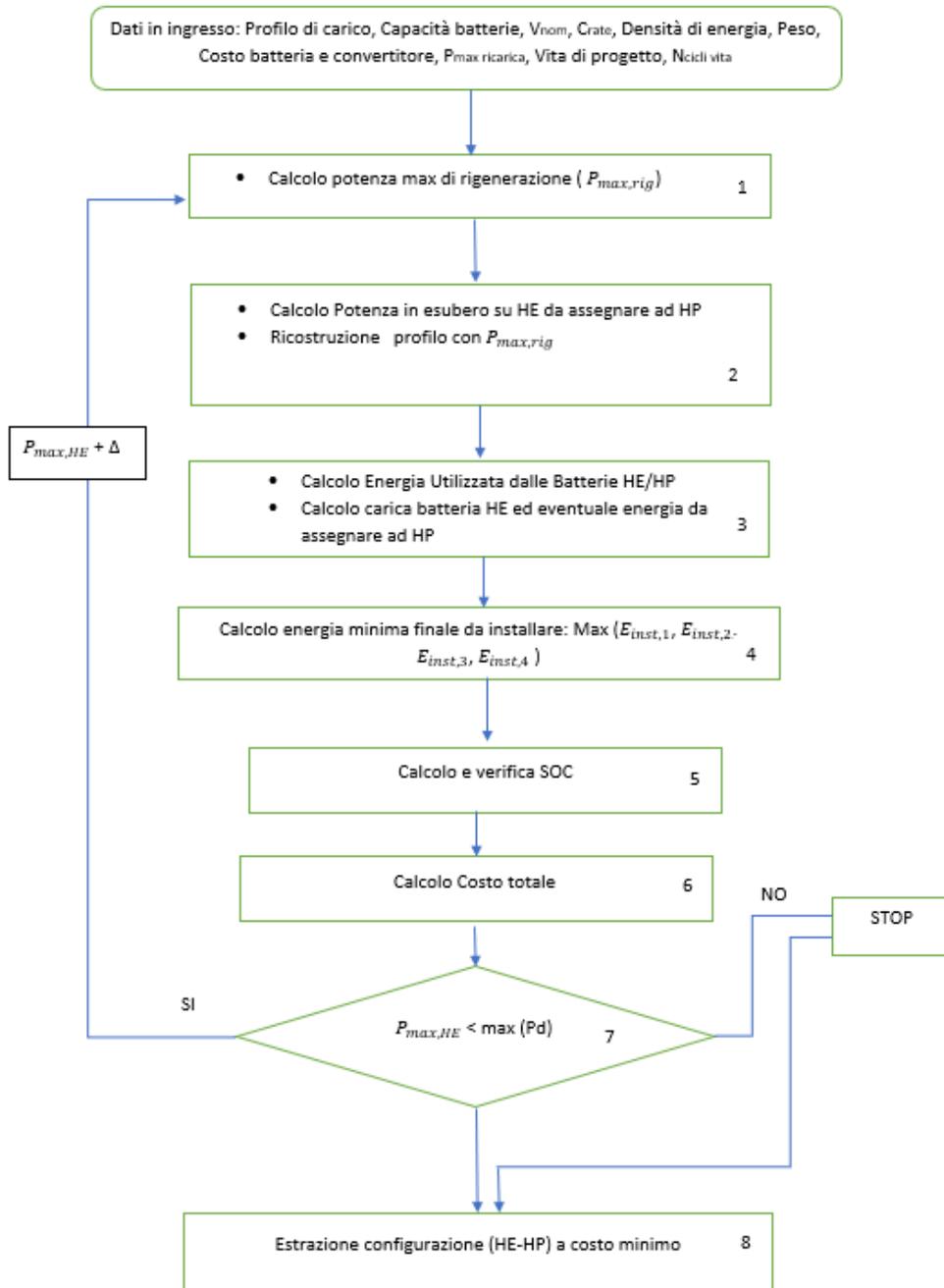


Figura 4.1: Diagramma di flusso per il dimensionamento a minor costo.

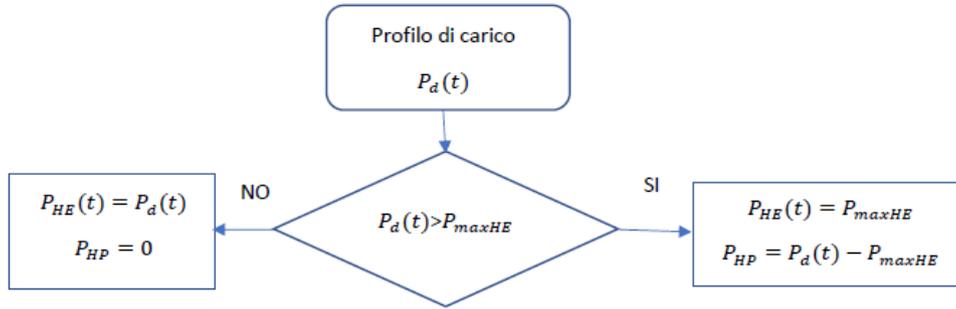


Figura 4.2: Diagramma di flusso per la gestione dell'energia attraverso HE e HP.

Sono forniti come dati in ingresso le caratteristiche le batterie in Tabella 3.1 e si considerano un numero di cicli di vita N_c sufficienti a soddisfare i parametri di progetto per 10 anni (intendendo come ciclo quante volte viene scaricata e ricaricata fino ad un certo DOD).

Successivamente viene stabilita una potenza di soglia indicata come potenza massima erogata dal pacco batteria HE che ad ogni iterazione viene incrementata di un delta prestabilito in fase di acquisizione dei dati.

Facendo sempre riferimento al diagramma di flusso di Figura 4.1 si esamineranno i vari blocchi:

1. Dal profilo di carico in ingresso viene estratta la potenza di scarica, cioè quella richiesta dal carico ($P_d(t) > 0$) ed in base alla potenza massima di soglia riferita ad HE si vanno a determinare le parti percentuali di energia della batteria HE e HP che tramite le Formule 4.1 e 4.2 identificano la massima potenza accettata per la ricarica delle batterie:

$$P_{max,rigHE} = P_{max,carica} \cdot C_{rate,HE} \cdot \%HE \quad (4.1)$$

$$P_{max,rigHP} = P_{max,carica} \cdot C_{rate,HP} \cdot \%HP \quad (4.2)$$

2. lo schema a blocchi di Figura 4.3 prende in esame la potenza massima di rigenerazione di HE calcolata nell'Equazione 4.2 e, nel caso in cui la potenza del profilo di carico risultasse maggiore della potenza massima di rigenerazione HE il profilo non cambierebbe; mentre se la potenza di carico risultasse minore della potenza massima di rigenerazione HE verrebbe alimentato un vettore con all'interno la potenza residua da assegnare ad HP mentre la potenza del profilo di carico verrebbe uguagliata alla potenza massima di rigenerazione di HE .

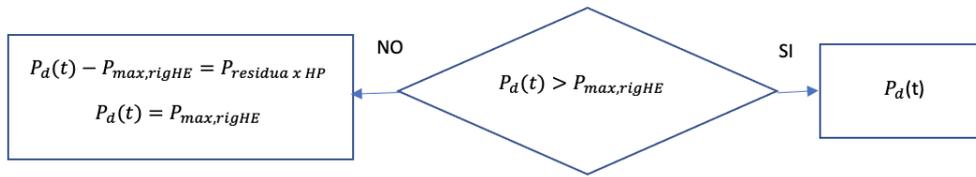


Figura 4.3: Confronto del profilo di carico con la potenza massima di rigenerazione HE.

A questo punto viene fatta la verifica sulla potenza residua che da *HE* passa ad *HP*, se questa risultasse maggiore della potenza massima di rigenerazione di *HP* verrebbe assegnata al profilo di carico la potenza residua di *HP*, al contrario, verrebbe assegnato il limite di rigenerazione di *HP*.

A questo punto è stato ricostruito il profilo di carico, tenendo conto dei limiti di potenza massima di rigenerazione;

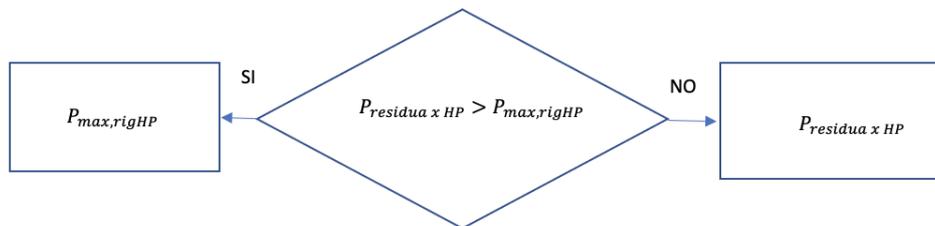


Figura 4.4: Confronto della potenza residua da assegnare ad HP con il suo limite di potenza di rigenerazione.

- con il nuovo profilo di potenza che tiene conto della potenza massima di rigenerazione, in base all'equazione 3.6 viene calcolata l'energia utilizzata, rispettivamente $E_{ut,HE}$ e $E_{ut,HP}$.

In base all'energia erogata e fornita tramite rigenerazione alla batteria *HE* viene calcolata l'energia cumulativa tramite integrazione. Nel caso in cui questa raggiungesse lo 0, cioè la sua carica completa, l'eventuale energia in esubero verrebbe assegnata alla batteria *HP*;

- attraverso le Equazioni 3.8, 3.9, 3.10 e 3.11 vengono calcolate le 4 energie minime da installare e si sceglie il valore massimo tra esse;
- ad ogni passo di campionamento viene calcolato l'andamento del *SOC* delle due batterie tramite la formula:

$$SOC = 1 - \frac{E_{ut}(t)}{E_{inst}} \quad (4.3)$$

nel caso in cui, tramite la rigenerazione, si superasse la soglia di *SOC* imposta del 90% verrebbe interrotta la fornitura di energia e fatto il ricalcolo dell'energia utilizzata durante il ciclo considerato;

6. ad ogni passo d'iterazione viene calcolato il costo totale tramite l'Equazione 3.13, basandosi su quanto indicato in Tabella 3.1;
7. la potenza di soglia massima per *HE* viene incrementata ad ogni iterazione e confrontata con la potenza massima del profilo di carico, questo finché l'ultima non viene raggiunta;
8. ad ogni iterazione sono stati immagazzinati il costo totale e la configurazione relativa (peso, energia minima, potenza ed energia erogata di ciascun pacco batteria) così da poter estrarre quella a minor costo al termine dell'analisi di ogni configurazione.

4.2 Altri metodi di gestione della potenza di ricarica

Uno dei fattori che influenza la gestione dell'energia del sistema di accumulo, e quindi i costi, è la potenza massima di ricarica. Essa può essere suddivisa tra le due tipologie di batterie con diversi criteri in modo da dimensionarle in modo più efficiente e di conseguenza ridurre i costi.

Vengono presentati altri due metodi per la ricarica:

1. Ad ogni configurazione di potenza massima di soglia richiesta relativa ad *HE* viene ricercata la migliore suddivisione della potenza massima di rigenerazione delle due tipologie di accumulo iterativamente, attraverso la seguente formula:

$$P_{max,rigHE} = P_{max,carica} \cdot C_{rate,HE} \cdot K \quad (4.4)$$

$$P_{max,rigHP} = P_{max,carica} \cdot C_{rate,HP} \cdot (1 - K) \quad (4.5)$$

dove *K* è il parametro che viene variato da 0 a 1 in maniera iterativa.

2. Come detto in precedenza, la priorità di ricarica viene assegnata alla parte *HE*; considerando, dalla tabella 3.1, che il costo a kWh della batteria di tipo *HP* è superiore di quella *HE*, si è pensato di invertire la priorità di ricarica, assegnandola ad *HP*, così da avere una batteria ridotta durante il suo dimensionamento. I diagrammi 4.5 e 4.6 mostrano quanto descritto:

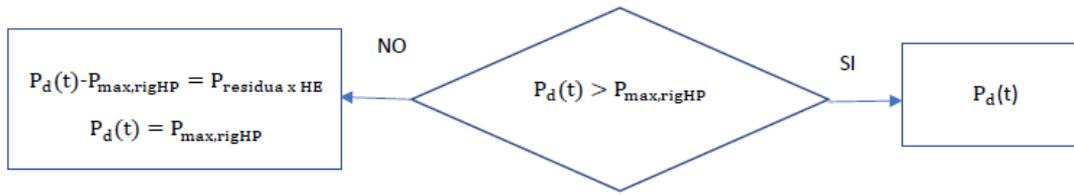


Figura 4.5: Confronto della potenza residua da assegnare ad HP con il suo limite di potenza di rigenerazione.

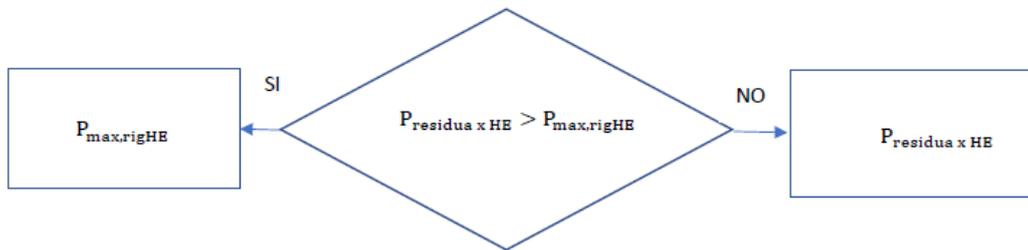


Figura 4.6: Confronto della potenza residua da assegnare ad HP con il suo limite di potenza di rigenerazione.

Per le ultime iterazioni della P_{soglia} viene limitata la potenza di ricarica verso *HP*, perché si è visto che l'energia $E_{\text{inst3}, \text{HP}}$ sarebbe stata eccessiva rispetto alle altre, portando quindi costi elevati senza alcun beneficio.

I risultati e considerazioni di queste metodologie verranno descritti nel Capitolo 5.

Capitolo 5

Risultati e discussione

In questo capitolo sono stati esaminati, tramite lo strumento di simulazione Matlab, dei profili di carico relativi ad imbarcazioni differenti:

1. Peschereccio tipo 1;
2. peschereccio tipo 2;
3. rimorchiatore;
4. tragheto tipo 1;
5. tragheto tipo 2;
6. battello.

Il primo profilo verrà analizzato in maniera esaustiva, spiegando ogni andamento delle varie curve, i successivi invece verranno presentati come confronto al primo o come peculiarità rispetto ad esso.

5.1 Peschereccio tipo 1

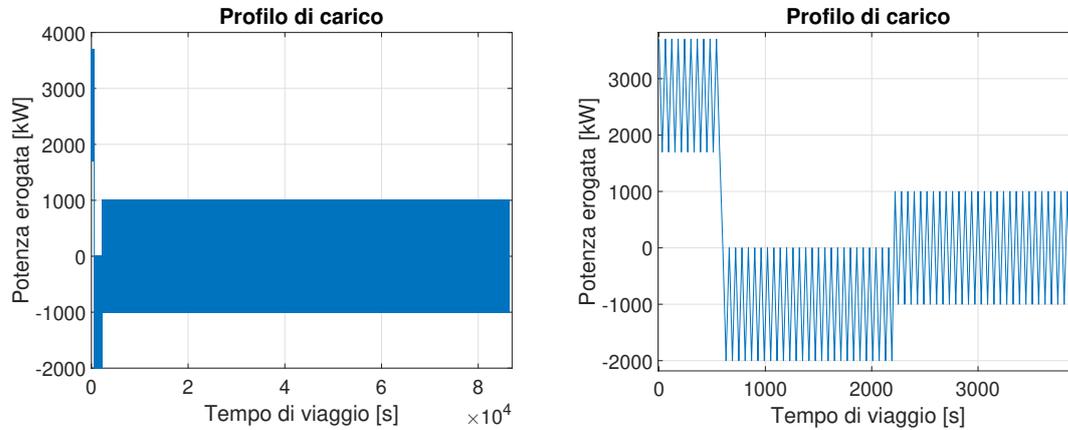


Figura 5.1: Profilo di carico del peschereccio di tipo 1.

I dati principali del profilo di carico fornito sono riassunti nella tabella seguente:

Tabella 5.1: Dati profilo di carico del peschereccio tipo 1.

Grandezza	Valore
Durata [s]	86400
Potenza massima di scarica [kW]	3700
Potenza massima di rigenerazione [kW]	-2000
Energia di scarica [kWh]	12130
Energia di carica [kWh]	-12141

I risultati principali ottenuti sono riassunti in Tabella 5.2, mentre i grafici e gli approfondimenti sono spiegati nei Paragrafi 5.1.1 e 5.1.2.

Tabella 5.2: Risultati numerici principali del peschereccio tipo 1.

Configurazione batteria	Priorità carica HE	Priorità carica HP
Energia inst. HE [kWh]	1425	0
Energia inst. HP [kWh]	620	925
P_{max} scarica HE [kW]	2466	0
P_{max} scarica HP [kW]	1233	3700
P_{max} ricarica HE [kW]	-1600	0
P_{max} ricarica HP [kW]	-400	-2000
Numero cicli vita	91000	58400
Anni di vita	10.5	10
Peso [kg]	13400	14676
Costo minimo [€]	765.000	666.000

5.1.1 Priorità di ricarica verso la batteria HE

In base al profilo di carico ed alle caratteristiche delle batterie di Tabella 3.1 si fissano le potenze massime di ricarica, suddividendole in percentuale iterativamente tra *HE* e *HP*; inizialmente dando priorità di ricarica ad *HE*, si fa variare il valore di potenza massima erogabile dalla stessa (sempre in maniera iterativa) e si trova il profilo dei costi in base alle differenti configurazioni:

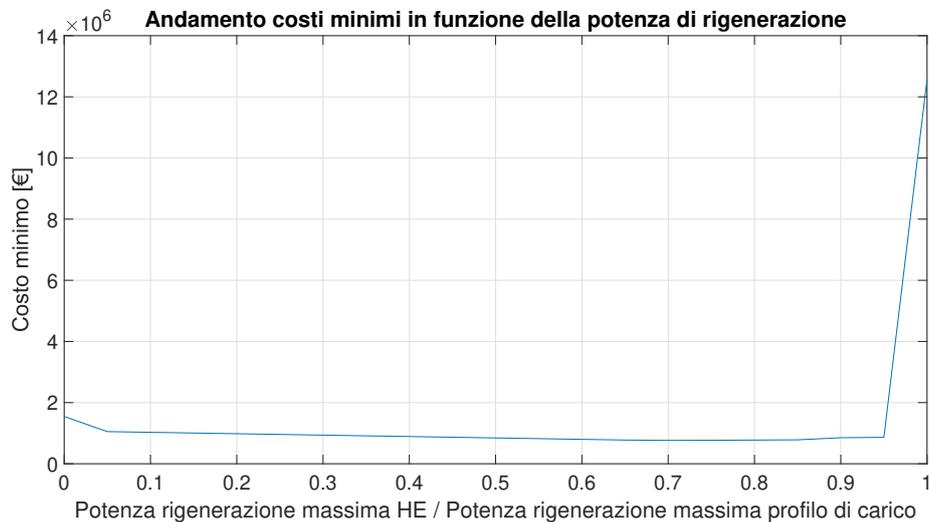


Figura 5.2: Profilo costi in funzione della potenza massima di rigenerazione lato HE.

Il tratto fino a 0.7 è in leggera decrescita, dopo aver raggiunto il valore di 765.000 € prosegue con una lieve crescita fino al valore di 0.95; l'ultimo punto ha una forte risalita di costo dovuta al fatto che questo rappresenta una ricarica totale verso *HE*, quindi nulla

verso *HP*, il che porta, in caso di utilizzo di quest'ultima, un dimensionamento molto più elevato.

Il costo minimo è stato calcolato determinando l'energia installata nelle batterie, ricavata secondo quanto detto nella Formula 3.12. I grafici degli andamenti dei valori di E_{inst1} , E_{inst2} , E_{inst3} e E_{inst4} in funzione della potenza massima di *HE* sono riportati nelle rispettive Figure 5.3 e 5.4:

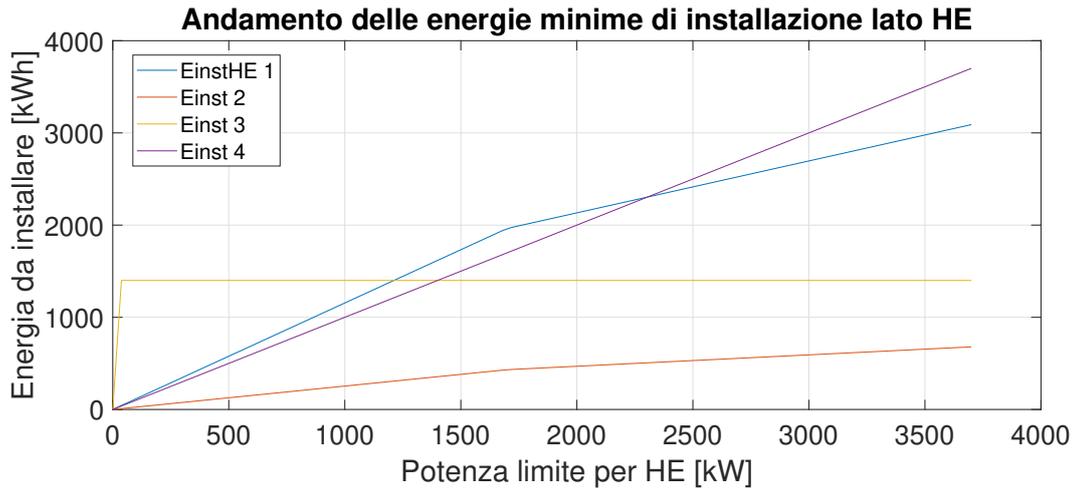


Figura 5.3: Energie minime da installare sulla batteria HE in funzione della sua potenza massima.

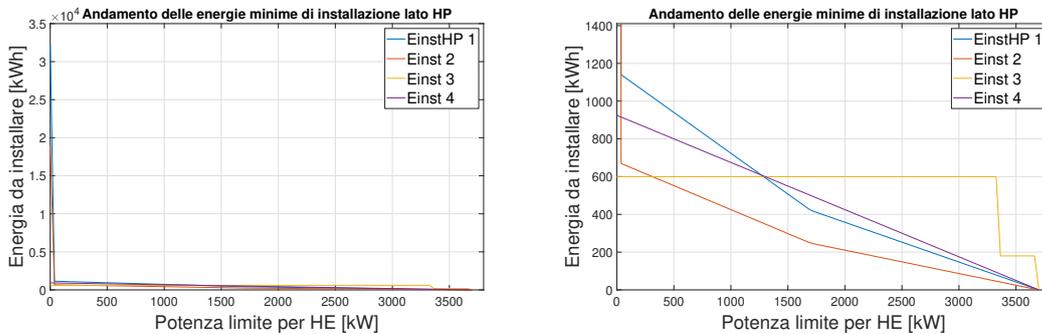


Figura 5.4: Energie minime da installare sulla batteria HP in funzione della sua potenza massima.

L'andamento rettilineo della E_{inst3} delle Figure 5.3 e 5.4 è dovuto al fatto che la $P_{max,ricarica}$ è sempre la stessa per ogni valore della potenza massima di soglia riferita alla batteria *HE*; questo criterio è stato modificato per potenze di soglia superiori a 2700 kW per la batteria *HP*: la potenza massima di ricarica viene limitata progressivamente, così da ridurre i costi della batteria visto che la E_{inst3} è quella dominante per il dimensionamento.

L'energia installata nelle batterie è 1425 kWh per HE e 620 kWh per HP , proprio nel punto d'incontro tra E_{inst1} e E_{inst3} .

In riferimento alle Figure 5.3 e 5.4 l'energia installata nelle batterie è $E_{inst,1}$ ed anche $E_{inst,3}$ che sono proprio nel punto di confine con un'energia di 1425 kWh per HE e 620 kWh per HP ;

Inoltre vengono espressi i costi e i pesi in funzione della P_{soglia} i cui andamenti sono mostrati nelle Figure 5.5 e 5.6:

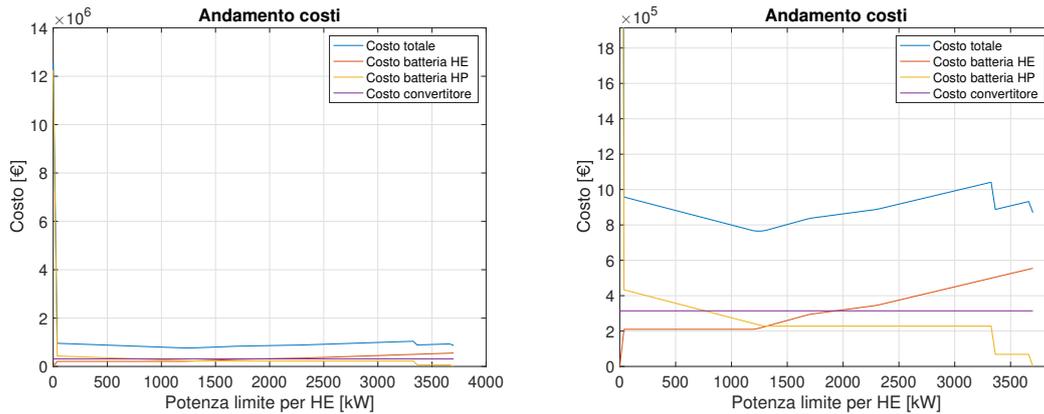


Figura 5.5: Andamento dei costi in funzione della P_{soglia}

L'andamento dei costi in Figura 5.5 dipende dalle energie installate minime E_{inst1} , E_{inst2} , E_{inst3} e E_{inst4} ; confrontando le curve delle Figure 5.3, 5.4 e 5.5 si ha la prevalenza nel tratto da 0 a 37 kW di $E_{inst1,HP}$, pur essendo le pendenze di $E_{inst1,HP}$ decrescente ed $E_{inst3,HE}$ crescente, ma la prima ha derivata maggiore (in valore assoluto) ed in aggiunta il peso del costo unitario è di 2.5 volte.

Nel tratto tra 37 e 1233 kW la $E_{inst3,HE}$ è costante mentre $E_{inst1,HP}$ è poco decrescente, di conseguenza il costo scende fino a raggiungere il minimo assoluto a 765.000 € .

Nei tratti successivi il costo è in leggera crescita, dovuto a $E_{inst1,HE}$.

Nel tratto tra 1233 e 3326 kW domina la $E_{inst3,HP}$ in quanto fortemente decrescente, creando un minimo relativo a 3326 kW .

Nell'ultimo tratto, tra 3326 e 3700 kW il costo cresce, dovuto a $E_{inst4,HE}$ in quanto con derivata fortemente crescente, superiore a $E_{inst3,HP}$;

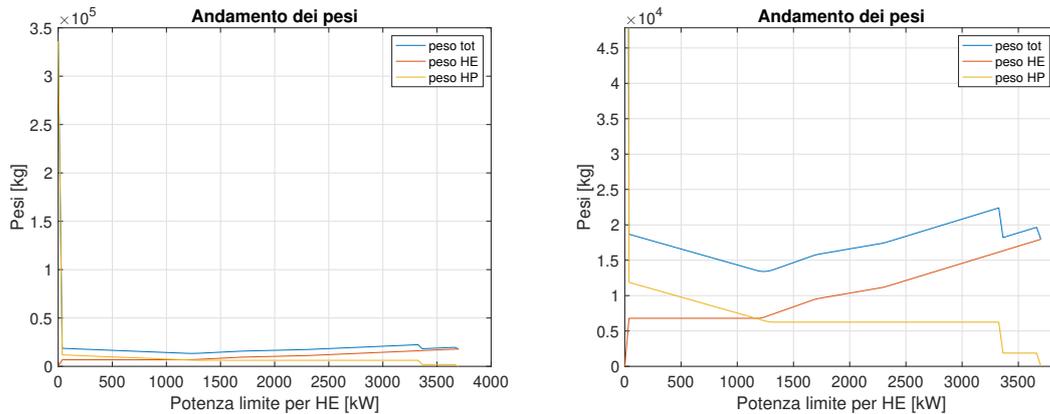


Figura 5.6: Andamento dei pesi in funzione della P_{soglia} .

In corrispondenza del costo minimo, come visualizzato in Figura 5.5, sono determinati i profili di potenza, energia e SOC del sistema di accumulo:

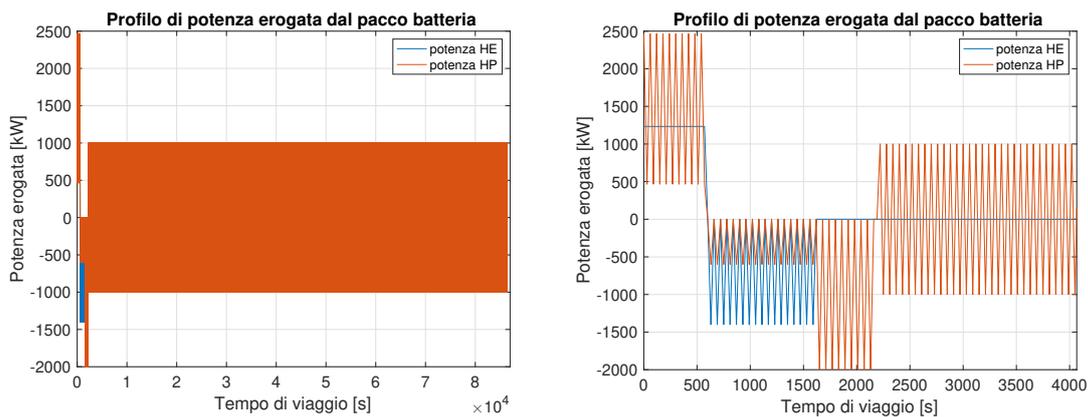


Figura 5.7: Profilo di potenza della batteria HE e HP.

Dalla Figura 5.7 la potenza viene suddivisa tra HE ed HP con una $P_{max,scarica,HE}=2467$ kW e $P_{max,scarica,HP}=1233$ kW . Si può vedere che la $P_{rigenerazione}$ viene suddivisa tra HE ed HP rispettivamente con -1400 kW e -600 kW , come detto precedentemente corrispondenti all' 70% ed 30%.

Questa suddivisione va da 630 a 1590 secondi, da 1590 s fino a 2190 s la batteria HE si è ricaricata e tutta la rigenerazione di -2000 kW viene fornita ad HP , oltre, la batteria HE non eroga più, mentre eroga la batteria HP che si scarica e si ricarica con le stesse potenze di scarica e di rigenerazione.

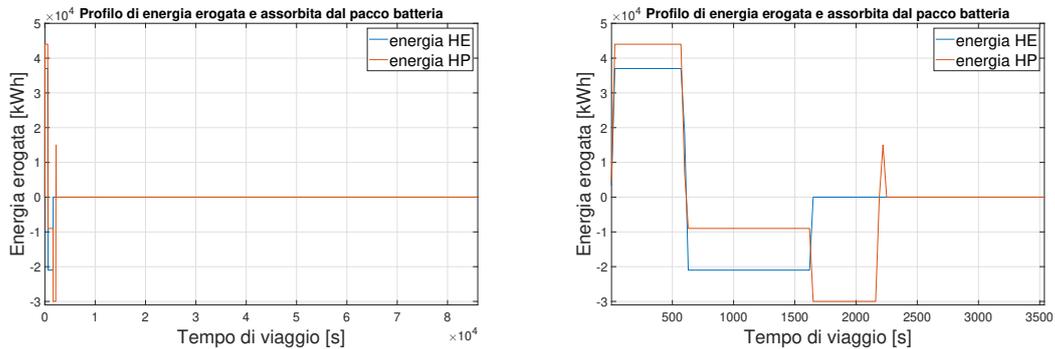
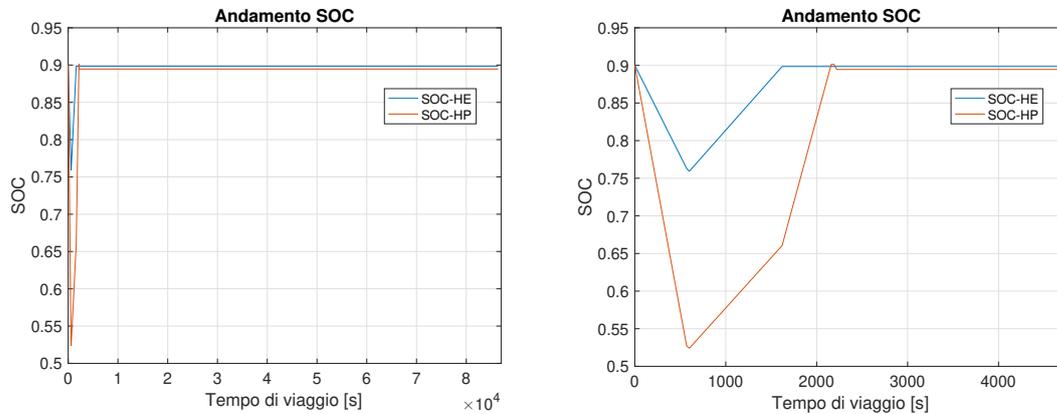


Figura 5.8: Profilo di energia dalla batteria HE e HP.

Figura 5.9: Andamento del *SOC* nel tempo.

Viene sempre verificato che non venga superato il valore massimo di *SOC* di 0.9 e minimo di 0.1 come mostrato in Figura 5.9. Nel caso di superamento la potenza viene inibita oppure attribuita all'altra batteria.

Le curve sono influenzate dal profilo di carico ed in particolare dai diagrammi di potenza. Infatti fino a 600 s l'*SOC* decresce fortemente per poi nel tratto da 600 a 1620 s e da 600 a 2160 s si ricaricano e il *SOC* è pressoché pari a 0.9. Rimane poi costante perché tanto consuma e tanto si ricarica.

Non si vede, come si potrebbe intuire, l'andamento a zig-zag nel tempo, perché tra due istanti di campionamento è compresa un'area positiva ed una negativa che sono di modulo uguali ma di segno opposto.

5.1.2 Priorità di ricarica verso la batteria HP

Dopo aver riportato i risultati trovati, attribuendo la priorità di ricarica alla batteria *HE*, vengono riportati i nuovi risultati con la priorità di ricarica verso quella *HP*.

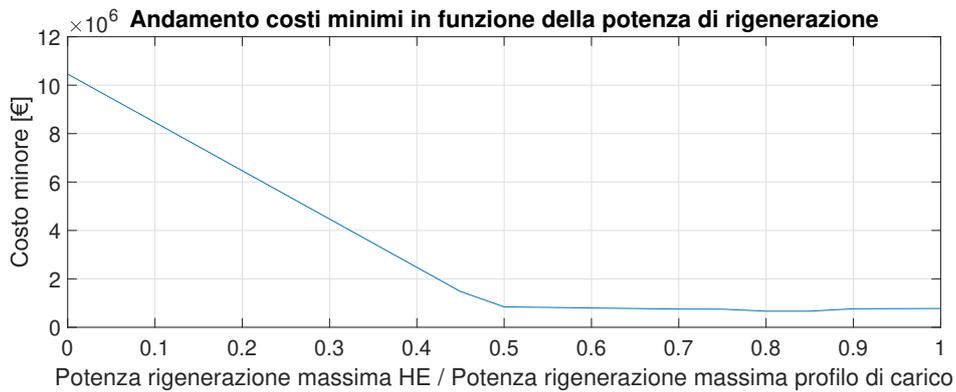


Figura 5.10: Profilo costi in funzione della potenza massima di rigenerazione lato HE.

Dalla Figura 5.10 si nota che nel tratto di ascissa fino a 0.5 si hanno costi elevati, dovuti al fatto che i costi di configurazione minima sono senza batteria *HP*, ed essendo quella *HE* molto limitata nella ricarica massima, la $E_{inst1,HE}$ di progetto è molto elevata. Il tratto costante si ha per valori di $P_{rigenerazione}$ di *HE* maggiori di 50% e con il minimo sempre in corrispondenza del 80%.

Con lo stesso metodo indicato in precedenza vengono calcolate le energie minime da installare nelle batterie con i relativi costi.

I grafici degli andamenti dei valori di E_{inst1} , E_{inst2} , E_{inst3} e E_{inst4} in funzione della potenza massima di *HE* sono riportati nelle Figure 5.11 e 5.12:

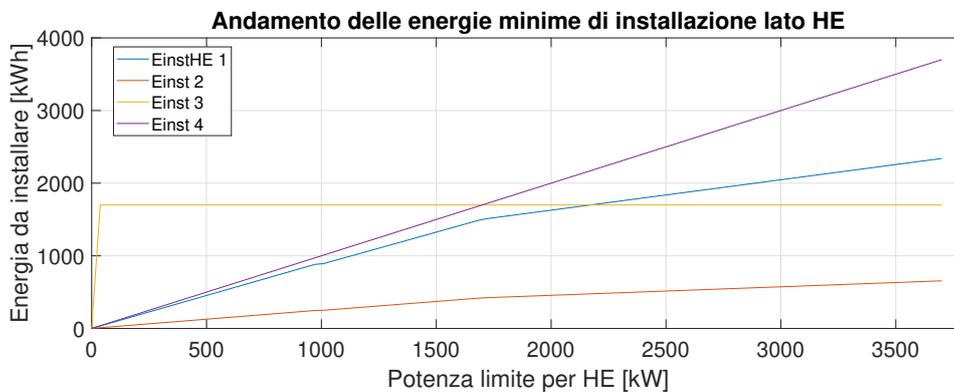


Figura 5.11: Energie minime da installare sulla batteria HE in funzione della sua potenza massima.

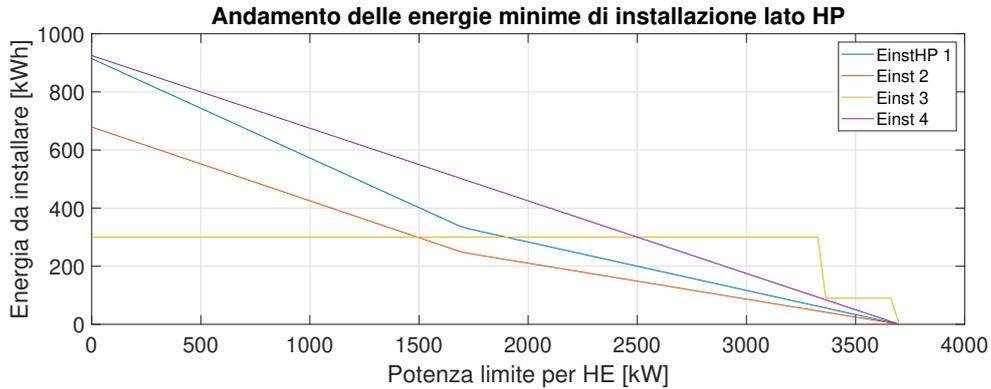


Figura 5.12: Energie minime da installare sulla batteria HP in funzione della sua potenza massima.

L'energia installata nelle batterie è pari a 1682 kWh per HP e 0 per HE, entrambe in corrispondenza con $E_{ins,3}$.

Inoltre vengono espressi i costi e i pesi in funzione della P_{soglia} i cui andamenti sono mostrati nelle Figure 5.13 e 5.14:

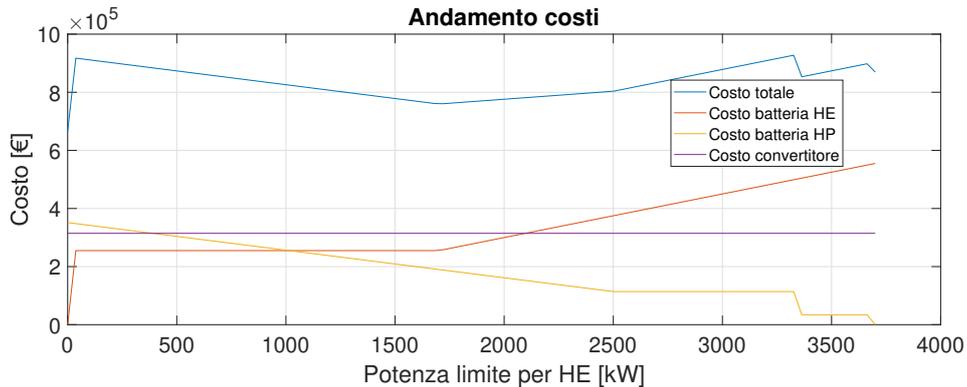


Figura 5.13: Andamento dei costi in funzione della P_{soglia} .

In riferimento alle Figure 5.5 e 5.13, rispettivamente con priorità di ricarica di HE e HP, si vede che il costo minimo si ha in un caso a 765.000 € con una P_{soglia} di 1233 kW (69.6% di HE), mentre nel secondo caso a 666.000 € con HP 100% e HE 0%;

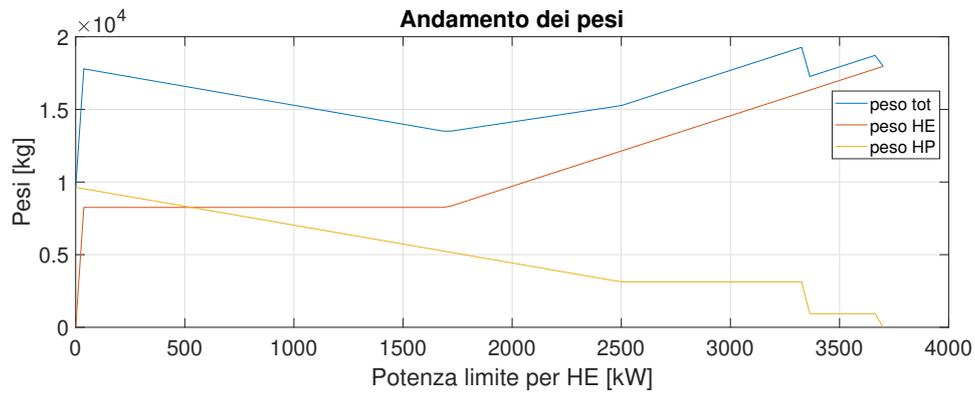


Figura 5.14: Andamento dei pesi in funzione della P_{soglia} .

In corrispondenza costo minimo, come visualizzato in Figura 5.13, sono determinati i profili di potenza, energia e SOC del sistema di accumulo:

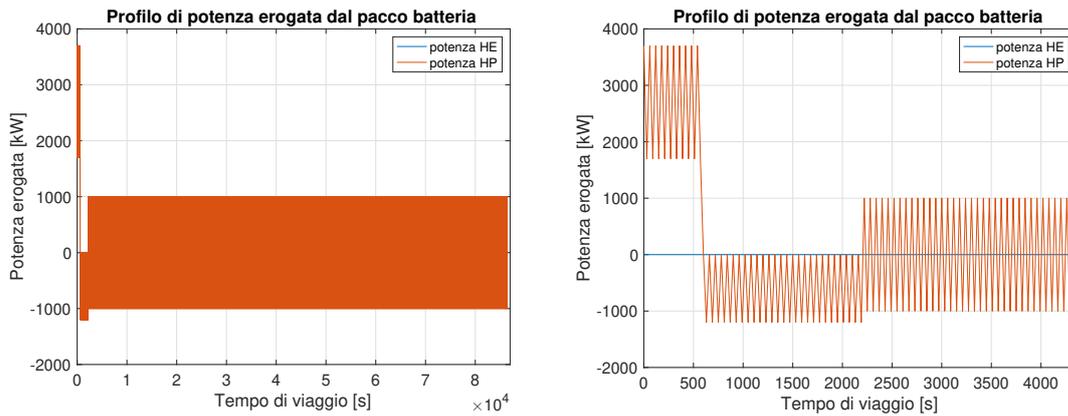


Figura 5.15: Profilo di potenza dalla batteria HE e HP.

La potenza viene fornita completamente dalla batteria HP , quindi con $P_{max,scarica}=3700$ kW e $P_{rigenerazione}=-2000$ kW .

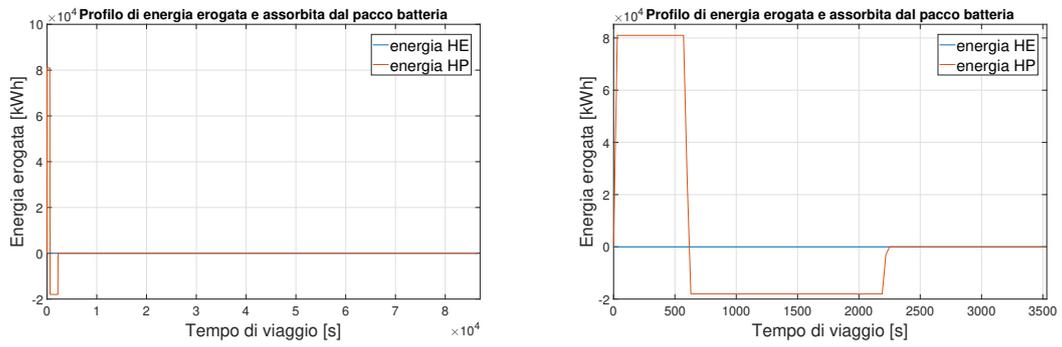


Figura 5.16: Profilo di energia dalla batteria HE e HP.

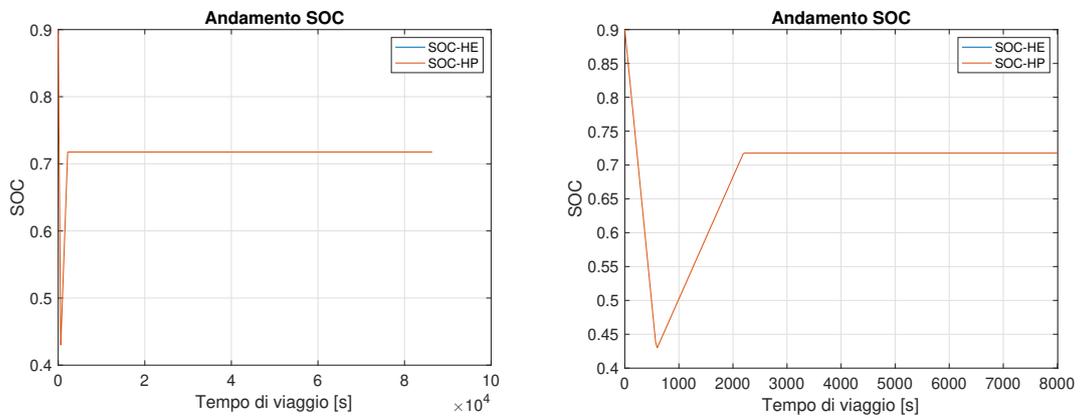


Figura 5.17: Andamento del SOC nel tempo.

5.2 Confronto dei risultati di Peschereccio tipo 1 con gli altri profili di carico

Si è proceduto al dimensionamento delle batterie secondo gli altri profili, i risultati principali sono mostrati in Tabella 5.3:

Tabella 5.3: Riassunto dei profili di carico.

Priorità ricarica sulla batteria HE

	Peschereccio 2	Rimorchiatore	Traghetto 1	Traghetto 2	Battello
Durata [s]	86.400	86.400	86.400	86.400	172.800
$P_{max,scarica,HE}$ [kW]	371	212	147	1900	150
$P_{max,scarica,HP}$ [kW]	547	2788	653	0	0
$P_{max,ric,HE}$ [kW]	-390	-300	-160	-2261	-390
$P_{max,ric,HP}$ [kW]	-600	-1000	-240	0	0
$E_{inst,HE}$ [kWh]	609	347	252	2261	390
$E_{inst,HP}$ [kWh]	230	697	288	0	0
N_{cicli}	72.000	20.440	52.670	17.700	44.000
Anni di vita	12	16	11	12	37
Peso [kg]	5354	8978	4216	11.000	1900
Costo [€]	256.760	573.000	215.000	500.000	71.000

Priorità ricarica sulla batteria HP

	Peschereccio 2	Rimorchiatore	Traghetto 1	Traghetto 2	Battello
Durata [s]	86.400	86.400	86.400	86.400	172.800
$P_{max,scarica,HE}$ [kW]	917	0	0	0	150
$P_{max,scarica,HP}$ [kW]	213	3000	800	1900	0
$P_{max,ric,HE}$ [kW]	-570	0	0	0	-390
$P_{max,ric,HP}$ [kW]	-120	-1000	-400	-2380	0
$E_{inst,HE}$ [kWh]	704	0	0	0	390
$E_{inst,HP}$ [kWh]	53	820	410	595	0
N_{cicli}	22.000	17.885	60.000	51.700	13.000
Anni di vita	10	14	11	10	20
Peso [kg]	3993	8540	4275	6200	1900
Costo [€]	202.500	566.500	224.000	388.000	71.000

5.2.1 Peschereccio tipo 2

Nella Figura 5.18 è rappresentato il profilo di potenza relativo al peschereccio di tipo 2:

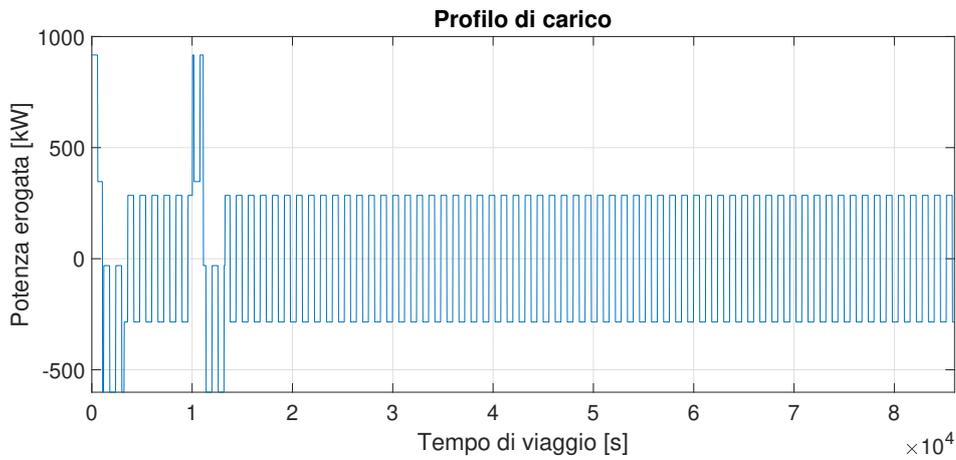


Figura 5.18: Profilo di carico del peschereccio di tipo 2.

Si è svolto il dimensionamento delle batterie per questo profilo attraverso il calcolo delle energie minime da installare, sia dando la priorità di ricarica verso *HE* sia verso *HP*; attraverso questo si sono determinati i relativi profili di potenza, visualizzati nelle Figure 5.19 e 5.20:

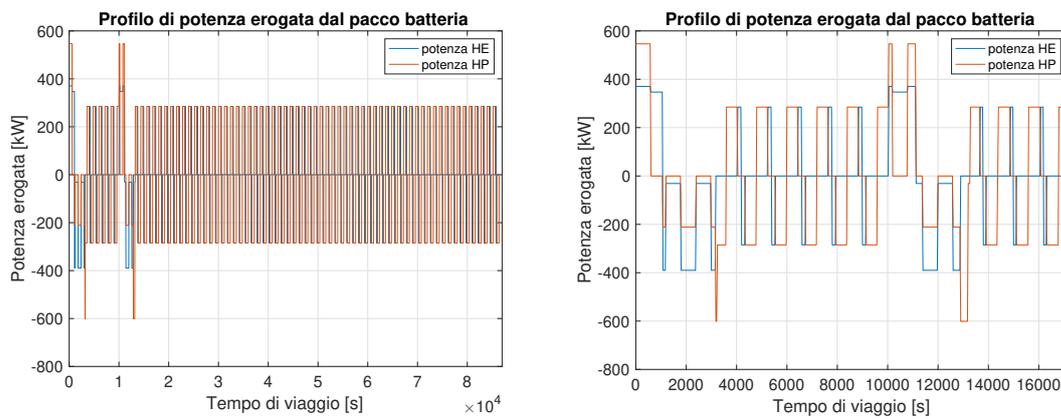


Figura 5.19: Profilo di potenza dalla batteria HE e HP con priorità di ricarica verso HE.

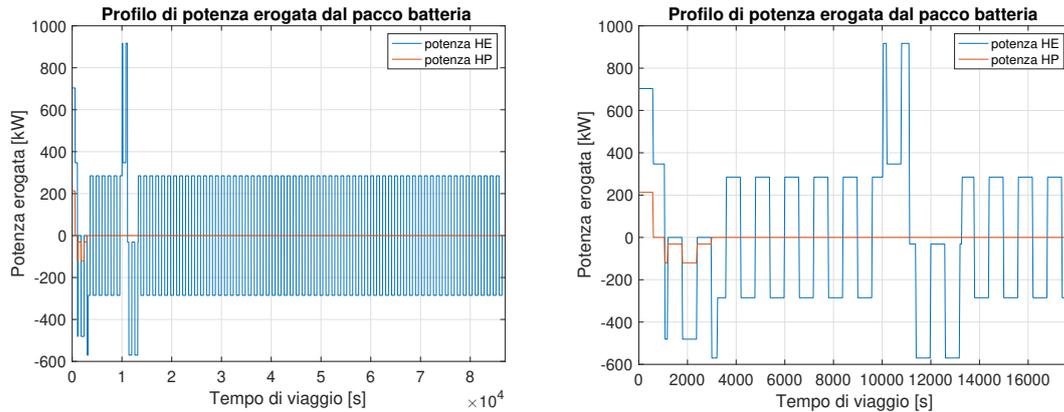


Figura 5.20: Profilo di potenza dalla batteria HE e HP con priorità di ricarica verso HP.

Gli andamenti dei grafici ricavati attraverso il profilo di Peschereccio 2 sono simili a quelli di Peschereccio 1.

Il profilo di potenza scelto è quello che da la priorità di ricarica alla batteria *HP* in quanto il costo minimo è di 202.500 € contro i 256.760 € della priorità verso *HE*.

Il sistema di accumulo scelto è composto da: una batteria ad alta energia, caratterizzato da una capacità di 704 kWh, una potenza massima erogata 917 kW ed una potenza massima accettabile di ricarica di 570 kW, che corrisponde al 95% della ricarica massima indicata dal profilo iniziale; una ad alta potenza ha un'energia installata di 53 kWh, la potenza massima di scarica è di 213 kW e la potenza massima di ricarica è 120 kW.

5.2.2 Rimorchiatore

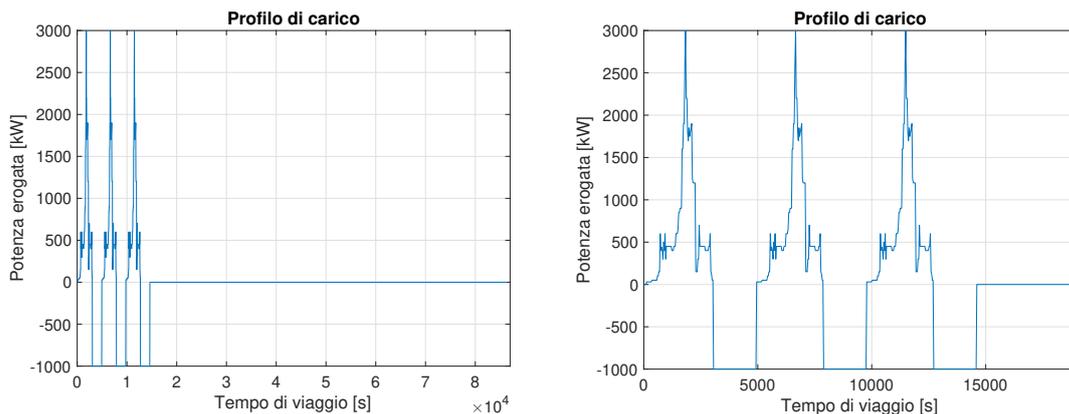


Figura 5.21: Profilo di carico del rimorchiatore.

Dai criteri di dimensionamento si è giunti al seguente profilo di potenza per la priorità di ricarica verso *HE*:

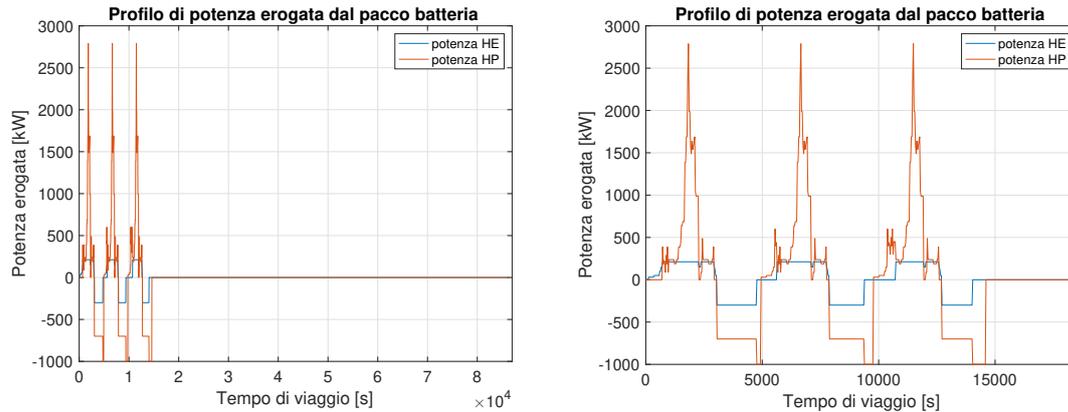


Figura 5.22: Profilo di potenza dalla batteria HE e HP.

Invece, per quanto riguarda la priorità di ricarica *HP*, l'andamento del profilo di potenza corrisponde esattamente a quello di Figura 5.21 poiché non vi è la presenza della batteria *HE*.

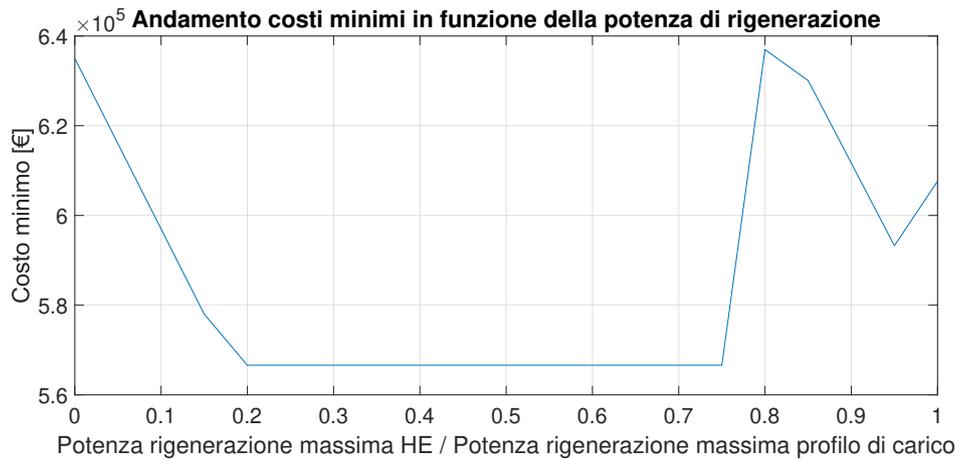


Figura 5.23: Profilo costi in funzione della potenza massima di rigenerazione lato HE.

Il diagramma di Figura 5.23 mostra che fino al valore di 0.7 sull'asse x c'è solamente la batteria *HP*; la parte iniziale decrescente è dovuta alla prevalenza di E_{inst2} e E_{inst3} mentre il tratto costante è dovuto a E_{inst4} che permane la prevalenza per la batteria *HP* fino a 1.

La parte oltre 0.7 è dovuta all'interazione anche alla presenza della batteria *HE*.

Il profilo di potenza scelto è quello che da la priorità di ricarica alla batteria *HP* in quanto il costo minimo è di 566.500 € contro i 573.000 € della priorità verso *HE*. Il sistema di accumulo è monotipo, totalmente ad alta potenza, con un'energia installata

di 820 kWh, la potenza massima di scarica è di 3000 kW e la potenza massima di ricarica è di 1000 kW.

5.2.3 Traghetto tipo 1

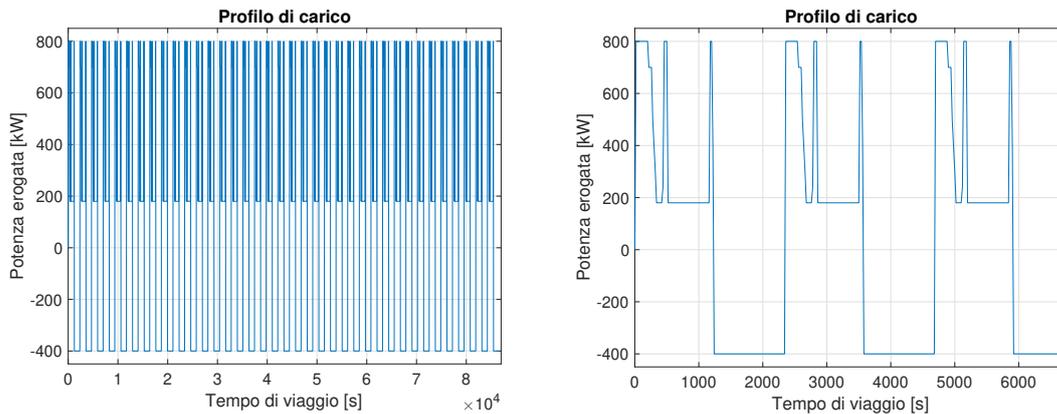


Figura 5.24: Profilo di carico del traghetto tipo 1.

Durante la fase di dimensionamento delle due batterie, attraverso il calcolo delle energie minime, si è notato due particolarità complementari intorno ad una potenza limite per HE di 150 kW, riportate nelle Figure 5.25 e 5.26:

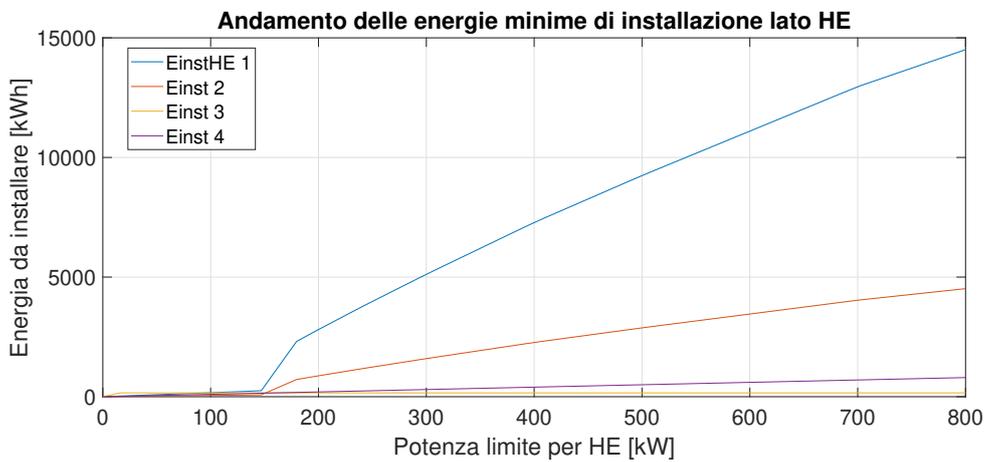


Figura 5.25: Energie minime da installare sulla batteria HE in funzione della sua potenza massima.

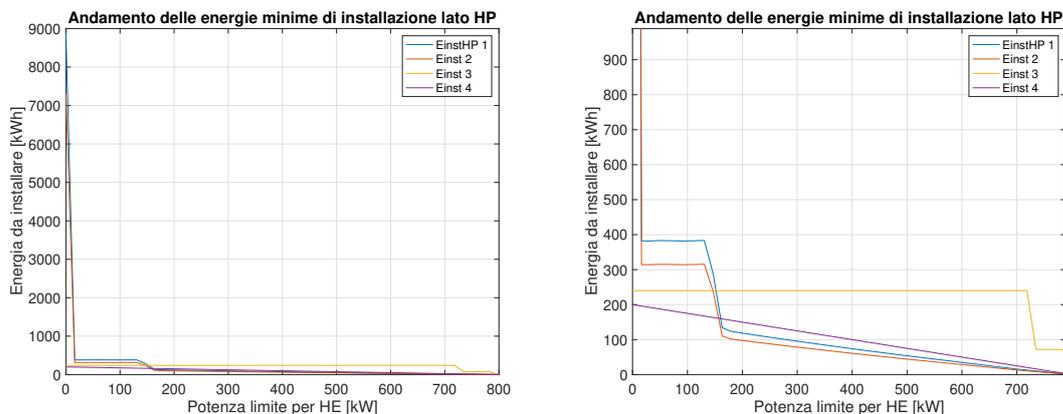


Figura 5.26: Energie minime da installare sulla batteria HP in funzione della sua potenza massima.

Il tratto ha forte pendenza perché l'energia utilizzata da *HP* si riduce notevolmente, in termini di area si visualizza in Figura 5.24, di conseguenza quella necessaria per *HE* deve aumentare.

Il profilo di potenza scelto è quello che dà la priorità di ricarica alla batteria *HE* in quanto il costo minimo è di 215.000 € contro i 224.000 € della priorità verso *HP*. Il sistema di accumulo scelto è composto da: una batteria ad alta energia, caratterizzato da una capacità di 252 kWh, una potenza massima erogata 147 kW ed una potenza massima accettata di ricarica di 160 kW che corrisponde al 40% della ricarica massima indicata dal profilo iniziale; una ad alta potenza ha un'energia installata di 288 kWh, la potenza massima di scarica è di 653 kW e la potenza massima di ricarica è 240 kW.

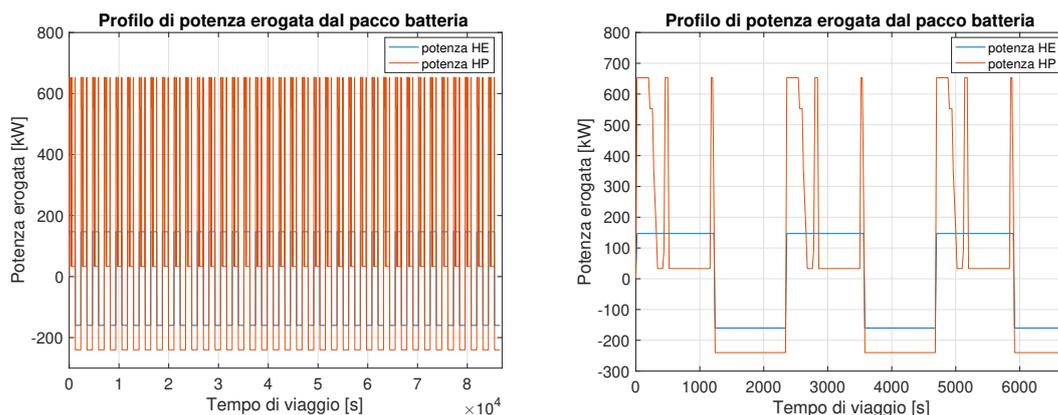


Figura 5.27: Profilo di potenza dalla batteria HE e HP.

5.2.4 Traghetto tipo 2

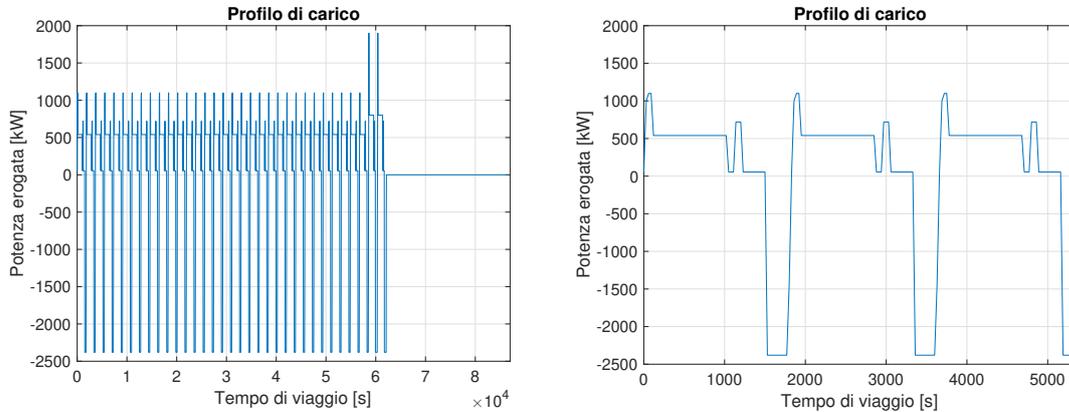


Figura 5.28: Profilo di carico del traghetto tipo 2.

Durante la fase di calcolo delle energie minime da installare per HE , con priorità di ricarica verso la batteria HP , si è notato un andamento spezzato della E_{inst1} e E_{inst2} nel tratto da 150 a 750 kW di Figura 5.29:

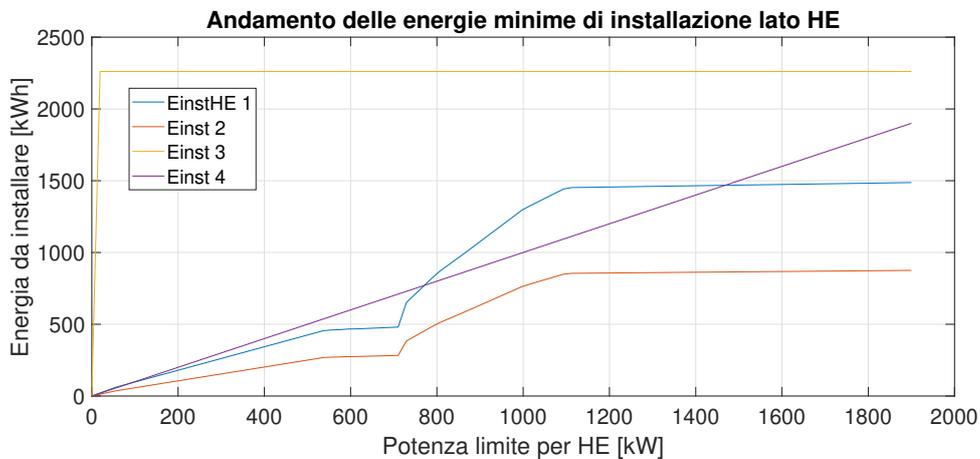


Figura 5.29: Energie minime da installare sulla batteria HE in funzione della sua potenza massima.

Questo comportamento è spiegato dal metodo di gestione dell'energia di ricarica che in questo caso viene assegnata prima ad HP , perciò l'energia in esubero che viene successivamente diretta ad HE è variabile in base alla potenza massima di ricarica accettata ed alla P_{soglia} .

Il profilo di potenza migliore è quello che ha solamente la batteria *HP* con una capacità di 595 *kWh*, una potenza massima erogata 1900 *kW* ed una potenza massima accettata di ricarica di 2380 *kW*.

5.2.5 Battello

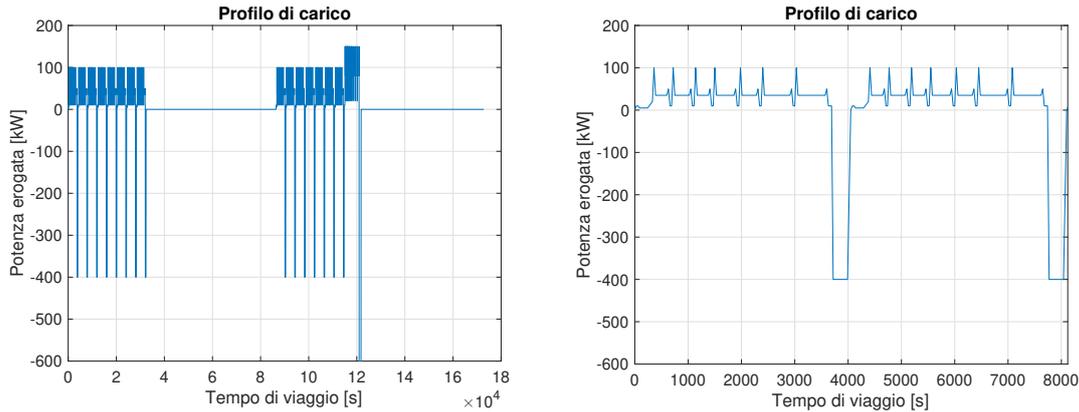


Figura 5.30: Profilo di carico del battello.

Come evidenziato in Tabella 5.12 il costo migliore è lo stesso sia con priorità di ricarica di *HE* sia *HP*, ossia di 71.000 € e il sistema di accumulo è sempre monotipo *HE*.

La batteria ha una capacità di 390 *kWh*, una potenza massima erogata di 150 *kW* ed una potenza massima accettata di ricarica di 390 *kW*.

5.3 Analisi in base alle oscillazioni di costo delle batterie

Si è inoltre analizzato quale impatto potesse avere l'applicazione della variazione sui costi base unitari (€/kWh) delle batterie *HE* e *HP*. Il campo di variazione è tra -15% e +15% rispetto al costo unitario base stabilito in Tabella 3.1.

Il risultato di tale analisi è impiegato prendendo come esempio il profilo di Peschereccio tipo 1 con priorità di ricarica verso la batteria *HP* presentato in questo capitolo.

Sono rappresentati due grafici tipici:

1. L'andamento dei costi in funzione della potenza di soglia massima di *HE* (P_{soglia}) tenendo conto che ogni curva fa riferimento a una combinazione di costo delle batterie tra il -15% e +15% del loro prezzo unitario base; si identifica nel punto di minor costo relativo se ci sono variazioni della percentuale di energia installata tra *HE* e *HP*;

2. rappresentazione su di un grafico iso-costo della combinazione della variazione percentuale del costo unitario delle batterie e del costo minimo relativo.

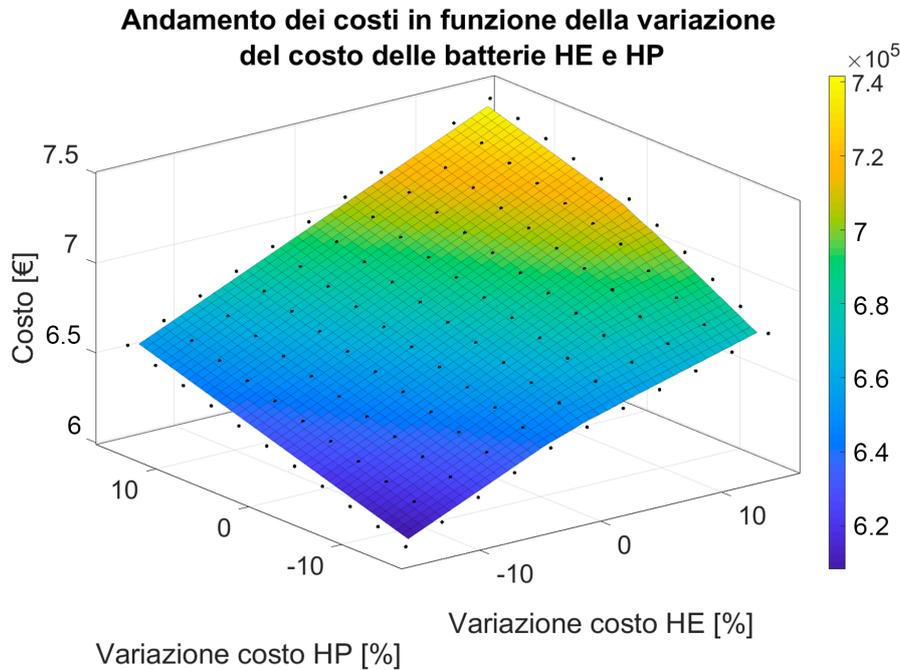


Figura 5.31: Costi minimi in funzione della variazione del costo unitario delle batterie.

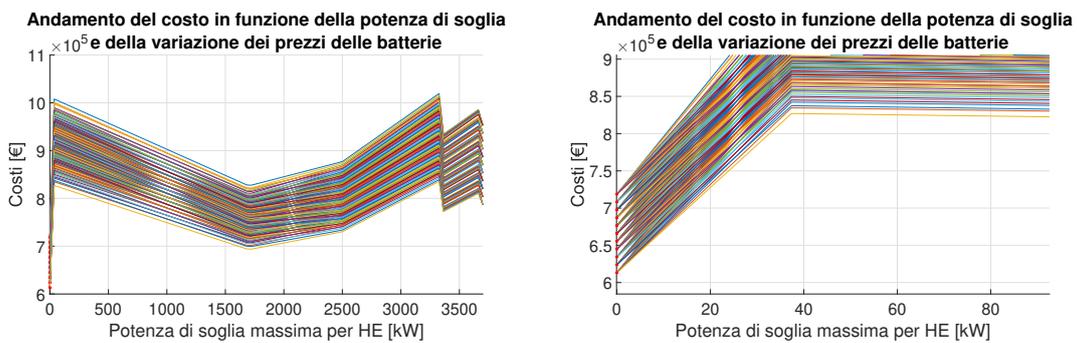


Figura 5.32: Costi finali in funzione della variazione di prezzo unitario delle batterie.

Dall'analisi dei grafici di Figura 5.32 relativi al ciclo Peschereccio tipo 1, che mostra tutte le curve di costo in funzione di ogni possibile combinazione di costo delle batterie, non si trova alcuna variazione percentuale di energia installata tra la batteria *HE* e quella *HP*, mantenendosi sempre sulla totalità per quella ad alta potenza. Ciò significa che, seppur nel caso di una configurazione di variazione rispetto al costo

base per *HE* del -15% e per *HP* del +15%, non conviene ancora, in termini di costi, ad inserire una batteria ad alta energia; questo anche grazie alla gestione della ricarica della batteria che durante la progettazione convoglia l'energia in via prioritaria alla batteria *HP*.

Inoltre è stata applicata la stessa variazione dei prezzi sugli altri profili di potenza presentati in questo capitolo e si è visto che la percentuale di batteria dedicata per *HE* ed *HP* rimane la stessa, sempre mantenendo la priorità di ricarica verso *HP*.

Capitolo 6

Progettazione del convertitore

6.1 Introduzione teorica

Nel sistema di alimentazione del mezzo navale è previsto un sistema di batteria/convertitore DC-DC, il quale convertitore è di tipo step-up in quanto serve innalzare la tensione di batteria per alimentare il carico. In Figura 6.1 è rappresentato lo schema di funzionamento:

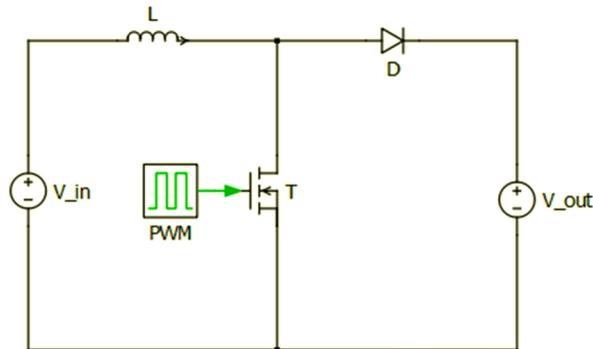


Figura 6.1: Schema del convertitore DC-DC boost a 1 quadrante.

Inizialmente l'interruttore T all'istante $t=0$ è in conduzione, la corrente d'ingresso cresce e scorre nell'induttanza L e sul ramo di T.

All'istante $t = t_1$, nel quale l'interruttore si apre, la corrente scorre sull'induttanza L, sul diodo D e sul carico. La corrente decresce fino a quando il transistor T entra nuovamente in conduzione. L'energia immagazzinata nell'induttanza viene trasferita sul carico.

In Figura 6.2 sono riportate le forme d'onda delle tensioni e delle correnti relativo ad un flusso continuo di corrente sul carico, assumendo che la corrente cresca e decresca linearmente.

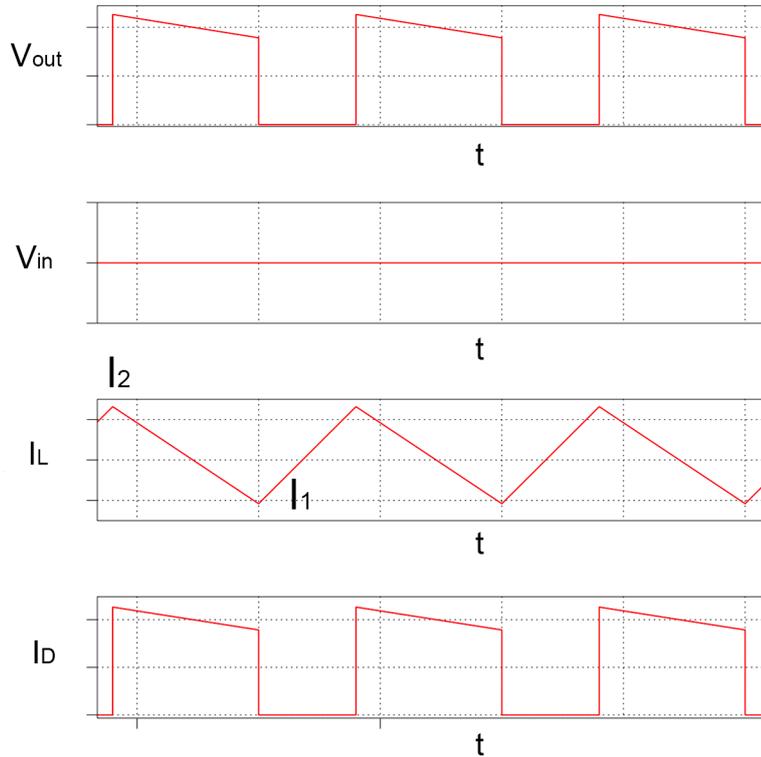


Figura 6.2: Forme d'onda principali.

Supponendo che la corrente sull'induttanza cresca linearmente da I_1 a I_2 nel tempo t_1 :

$$V_{in} = L \cdot \frac{I_2 - I_1}{t_1} = L \cdot \frac{\Delta I}{t_1} \quad (6.1)$$

Dove ΔI è il ripple di corrente sull'induttanza.

Supponendo che la corrente sull'induttanza decresca linearmente da I_2 a I_1 nel tempo t_2 :

$$V_{in} - V_{out} = L \cdot \frac{I_1 - I_2}{t_2} = -L \cdot \frac{\Delta I}{t_2} \quad (6.2)$$

Ponendo $t_1 = kT$ e $t_2 = (1 - k)T$, dove k è il duty cycle, si ottiene la tensione media d'uscita:

$$V_{out} = V_{in} \cdot \frac{T}{t_2} = \frac{V_{in}}{1 - k} \quad (6.3)$$

Supponendo il circuito privo di perdite, $V_{in} \cdot I_{in} = V_{out} \cdot I_{out}$, la corrente media in ingresso vale:

$$I_{in} = \frac{I_{out}}{1 - k} \quad (6.4)$$

Sapendo che $k = t_1/T = t_1 \cdot f$ e $T = t_1 + t_2$ e sostituendo nelle equazioni precedenti, si ottiene il valore picco-picco della corrente di ripple ΔI :

$$\Delta I = \frac{V_{in}(V_{out} - V_{in})}{fLV_{out}} \quad (6.5)$$

Oppure:

$$\Delta I = \frac{V_{in}k}{fL} \quad (6.6)$$

Nel nostro caso il convertitore deve essere pensato per quelle applicazioni in cui le correnti possono essere positive e negative ovvero non viene solo fornita corrente al carico, ma la batteria può essere ricaricata. Pertanto, il convertitore, come in Figura 6.12, è a 2 quadranti, cioè si inverte la corrente, ma la tensione non inverte il segno. Questo circuito è formato da due interruttori e due diodi, molto spesso i componenti commutanti vengono commercializzati già dotati di diodo in antiparallelo.

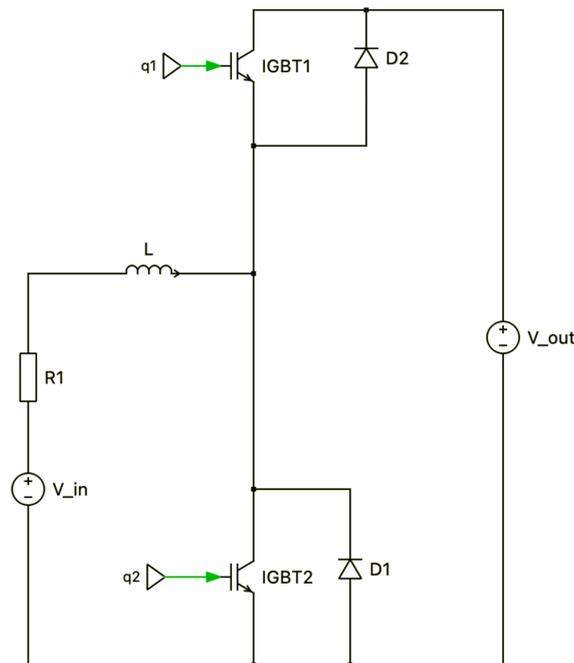


Figura 6.3: Schema elettrico del convertitore DC-DC bidirezionale.

Questo convertitore ha due modalità operative: buck e boost.

Modalità operativa Buck

Quando il convertitore funziona al contrario, il bus DC trasferisce energia alla batteria attraverso il convertitore DC-DC bidirezionale. A questo punto, T1 è acceso e T2 deve essere spento. Quando T1 è acceso, il bus DC caricherà la batteria tramite l'interruttore T1 e l'induttore L, poiché $V_{out} > V_{in}$, la corrente nell'induttore i_L aumenta linearmente e l'energia viene immagazzinata nell'induttore sotto forma di energia del campo magnetico. Quando T1 è spento, il diodo D1 è acceso e la corrente i_L scorre attraverso il diodo D1. Nel frattempo, la tensione sull'induttore è $-V_{in}$, quindi i_L diminuisce linearmente, rilascia energia che si trasferisce verso la batteria. La topologia della modalità operativa buck è illustrata nella Figura 6.4:

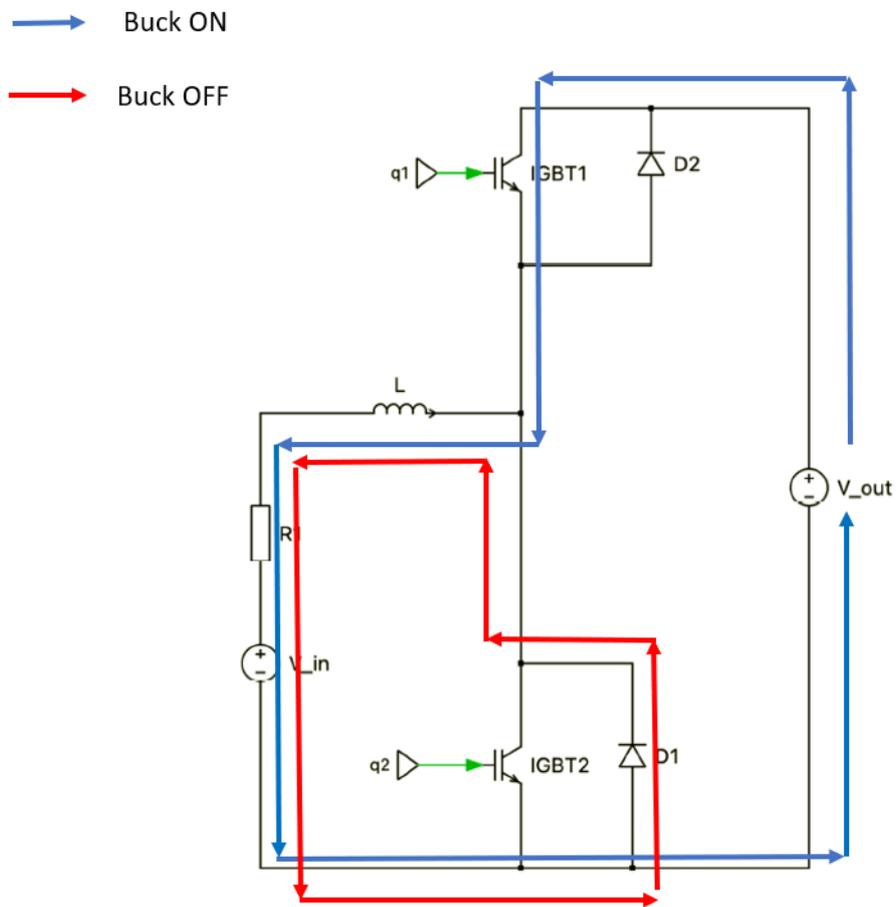


Figura 6.4: Schema modalità operativa buck.

Modalità operativa Boost

Quando il convertitore funziona in avanti, la batteria trasferisce energia al bus DC tramite il convertitore DC-DC bidirezionale. In queste condizioni T2 è in ON e T1 è in OFF. Quando T2 è acceso, la tensione della batteria V_{in} viene applicata ai capi dell'induttore L; la corrente i_L aumenta linearmente e la batteria carica l'induttore; l'energia elettrica viene immagazzinata sotto forma di energia del campo magnetico. Quando T2 è spento, il diodo D2 è acceso, la batteria e l'induttore forniscono energia al bus DC attraverso il diodo D2, quindi viene rilasciata energia e la corrente diminuisce gradualmente.

La modalità di funzionamento boost è illustrata in Figura 6.5:

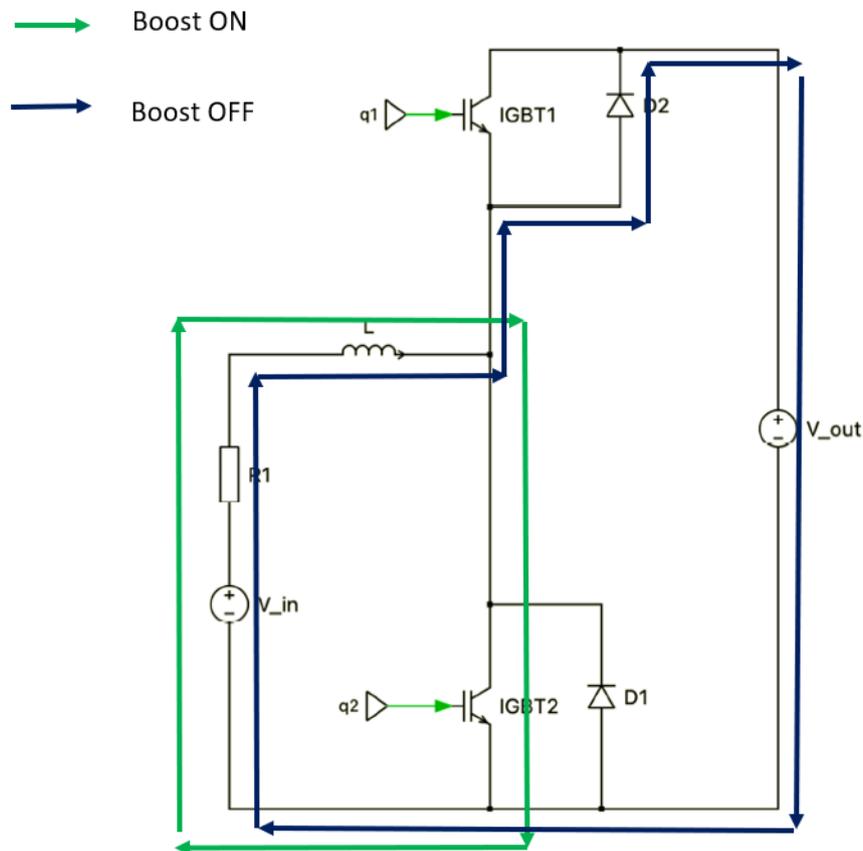


Figura 6.5: Schema modalità operativa boost.

6.1.1 Logica di controllo

Il controllo di tali interruptori ricopre un ruolo fondamentale nel processo di conversione energetica. Tali dispositivi non regolano solamente la tensione media fornita al carico, ma anche la potenza che esso assorbe. Viene usata la modulazione PWM sugli interruptori T1 e T2.

Il controllo è schematizzato in Figura 6.6:

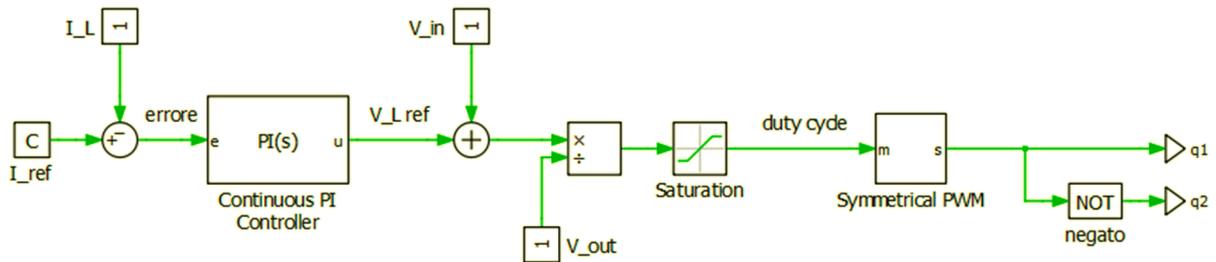


Figura 6.6: Sistema del controllo di corrente del convertitore.

Un riferimento di corrente sull'induttanza viene dato come input e viene confrontato alla corrente che effettivamente scorre su di essa, la loro differenza genera un errore. Questo è l'ingresso del regolatore PI con anti windup (che può presentarsi nei controllori con azione integrale quando il comando di attuazione raggiunge dei valori massimi e minimi) composto da un guadagno costante K_p ed un termine integrativo K_i/s ; la funzione di trasferimento del regolatore è descritta da un polo nell'origine e da uno zero:

$$G_{pi}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} = \frac{1 + s\tau}{s\tau} \cdot K_p \quad (6.7)$$

Dove:

$$\tau = K_p/K_i;$$

$$K_p = \omega_b L;$$

$$K_i = 0.1\omega_b K_p;$$

ω_b ampiezza di banda dell'anello di corrente.

Per la stabilità occorre dimensionare i guadagni del regolatore in modo che:

- La banda dell'anello chiuso sia sufficientemente limitata rispetto alla frequenza di commutazione, ovvero $\omega_b < 1/T$ e quindi $f_b = f_{sw}/10$;
- lo zero dell'integrativa sia posizionato ad una pulsazione inferiore alla banda.

In uscita dal regolatore abbiamo la tensione di riferimento sull'induttanza che attraverso un feedforward della tensione in ingresso vengono riportate alla tensione di uscita per ottenere un duty cycle di riferimento e quindi i 2 comandi complementari ai transistor T1 e T2, considerando il tempo morto nullo.

6.1.2 Dissipazione negli interruttori di potenza

Nell'ambito delle perdite prendiamo in considerazione un interruttore che può essere un transistor o un diodo:

- In condizioni statiche l'interruttore T è chiuso e scorrerà una corrente I_{on} , si avrà ai suoi capi una tensione V che dipende dalla caratteristica del dispositivo, di conseguenza la potenza $P_{on} > 0$;
- in condizioni statiche l'interruttore T è chiuso e avrà una corrente I_{off} dell'ordine dei nA/mA, di conseguenza P_{off} è trascurabile;
- in condizioni dinamiche l'interruttore T si sta per chiudere, durante la commutazione è un generatore di corrente a rampa crescente; la corrente I passa da 0 a I_{on} in un tempo $t_{sw,on}$; passato tale tempo la tensione passa da V_{off} a V_{on} , come mostrato in Figura 6.7:

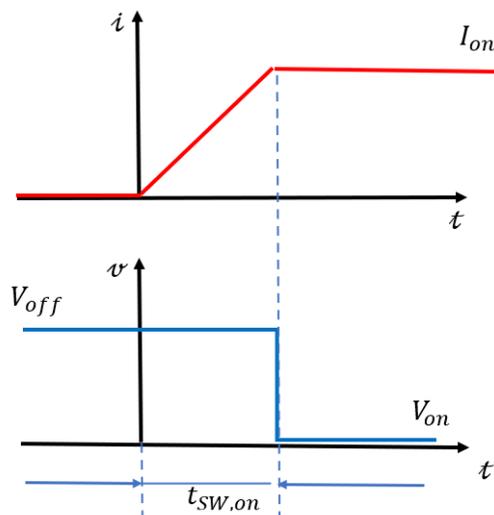


Figura 6.7: Transitorio di turn-on dell'interruttore.

L'energia dissipata per ogni commutazione è:

$$E_{sw,on} = \frac{V_{off} I_{on}}{2 \cdot t_{sw,on}} \quad (6.8)$$

Quindi la potenza dissipata in commutazione di accensione è:

$$P_{sw,on} = E_{sw,on} \cdot f_{sw} \quad (6.9)$$

- in condizioni dinamiche l'interruttore T si sta per aprire, durante la commutazione, l'interruttore elettronico è un generatore di corrente a rampa decrescente; la corrente I passa da I_{on} a 0 in un tempo $t_{sw,off}$ passato tale tempo la tensione passa da V_{on} a V_{off} .
L'energia dissipata ad ogni commutazione è:

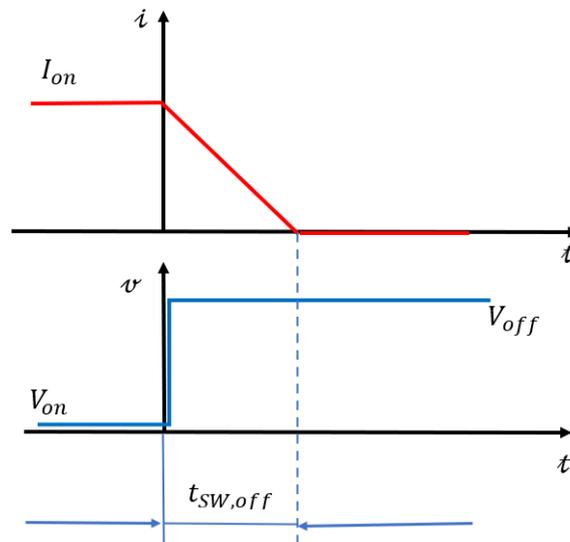


Figura 6.8: Transitorio di turn-off dell'interruttore.

$$E_{sw,off} = \frac{V_{on}I_{off}}{2 \cdot t_{sw,off}} \quad (6.10)$$

Quindi la potenza dissipata in commutazione di accensione è:

$$P_{sw,off} = E_{sw,off} \cdot f_{sw} \quad (6.11)$$

Le perdite complessive sono:

$$P_d = P_{on} + P_{off} + P_{sw,on} + P_{sw,off} \quad (6.12)$$

In Figura 6.9 è rappresentata la potenza totale dissipata in funzione della frequenza:

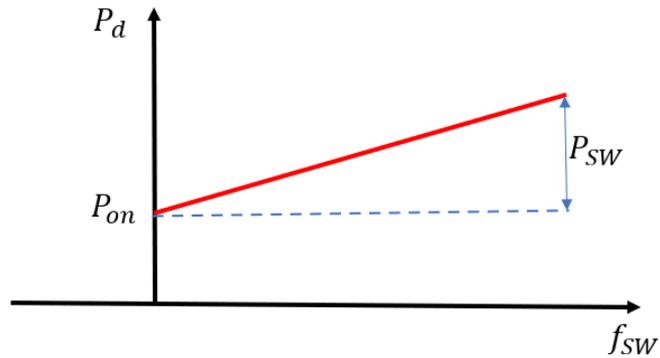


Figura 6.9: Diagramma delle perdite nell'interruttore.

6.1.3 Modellistica dei dissipatori

A causa delle perdite di conduzione e commutazione si ha la generazione di calore all'interno dei dispositivi elettronici di potenza. Questo calore deve essere trasferito dal dispositivo ad un mezzo di raffreddamento in modo da mantenere la temperatura delle giunzioni dei dispositivi di potenza entro i limiti previsti per il corretto funzionamento. Il calore deve fluire dal dispositivo al suo rivestimento e quindi al dissipatore e al mezzo di raffreddamento come mostrato in Figura 6.10:

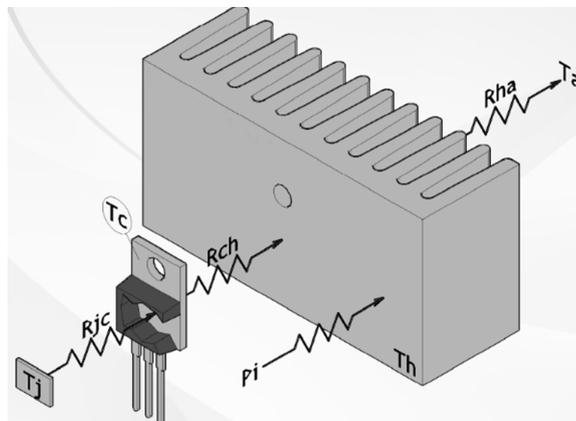


Figura 6.10: Schema del dissipatore termico.

Per una semplificazione visiva viene anche riportato l'equivalente elettrico del circuito termico:

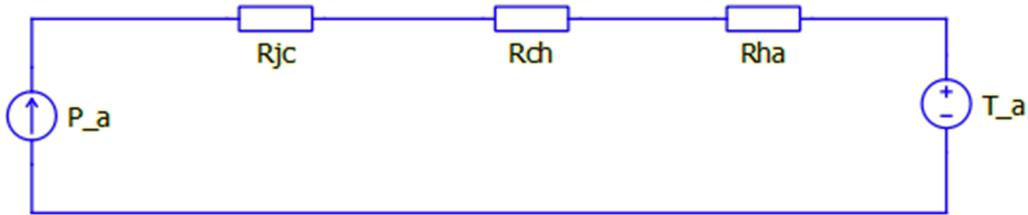


Figura 6.11: Equivalente elettrico del circuito termico.

Se P_a è la potenza media dovuta alle perdite del dispositivo montato su un dissipatore di calore, la temperatura di giunzione T_j di un dispositivo è data da:

$$T_j = P_a(R_{jc} + R_{ch} + R_{ha}) \quad (6.13)$$

Dove:

- R_{jc} : resistenza termica dalla giunzione all'involucro $^{\circ}C/W$;
- R_{cs} : la resistenza termica dell'involucro al dissipatore $^{\circ}C/W$;
- R_{sa} : la resistenza termica dal dissipatore all'ambiente $^{\circ}C/W$;
- T_j : temperatura di giunzione;
- T_c : temperatura dell'involucro;
- T_h : temperatura del dissipatore;
- T_a : temperatura ambiente.

R_{jc} e R_{ch} sono di norma fornite da produttore del dispositivo. Una volta che le perdite del dispositivo P_a sono note, è possibile calcolare la resistenza termica richiesta dal dissipatore per una determinata temperatura ambiente T_a .

6.2 Modellizzazione del convertitore

Per far funzionare ogni accumulo di energia in modo ottimale e secondo le sue caratteristiche, i dispositivi di accumulo dell'energia devono essere disaccoppiati. La topologia scelta è quella ibrida in parallelo e completamente attiva, cioè le batterie sono disaccoppiate da due convertitori bidirezionali, come riportato in Figura 6.12:

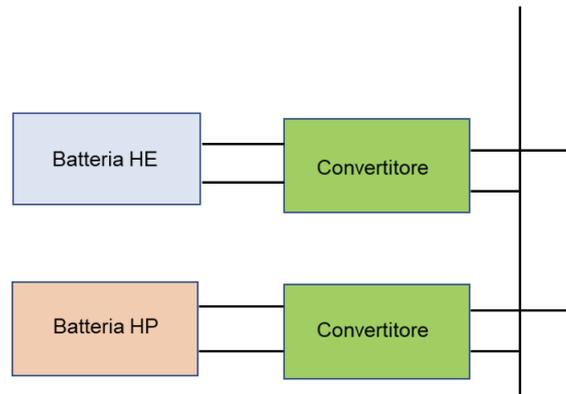


Figura 6.12: Configurazione dei convertitori DC-DC.

Come esempio di applicazione si è scelto quello del Peschereccio tipo 1 con priorità di ricarica verso *HE* in quanto, pur non rappresentando la soluzione a minor costo, è quella che permette di svolgere in maniera più completa il dimensionamento dei convertitori. Come riferimenti si considerano i seguenti dati:

Tabella 6.1: Dati di riferimento per la progettazione dei convertitori.

Requisiti	Convertitore HE	Convertitore HP
Tensione ingresso [V]	600	600
Tensione di uscita [V]	1000	1000
Frequenza di commutazione [kHz]	10	10
P_{max} [kW]	1233	2466
I_{max} [A]	1233	2466

Dalle specifiche si prevede l'utilizzo di un convertitore di tipo boost bidirezionale in corrente, poiché è necessario elevare la tensione sul bus DC da 600 a 1000 V e permettere la ricarica e la rigenerazione attraverso l'inversione della corrente.

Lo schema elettrico è mostrato in Figura 6.3:

Come raffreddamento si è utilizzato una piastra con un ingresso per il fluido di raffreddamento di diametro pari a 18 mm, come mostrata in Figura 6.13:

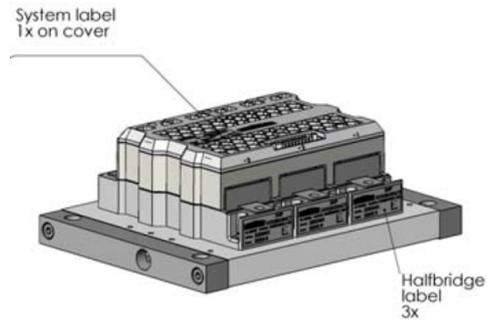


Figura 6.13: Dissipatore termico del convertitore.

Come fluido di raffreddamento si è scelta una soluzione con glicole etilenico con concentrazione e flusso variabili in base alle perdite del convertitore preso in analisi, così da avere la resistenza termica desiderata, come visualizzato in figura 6.14.

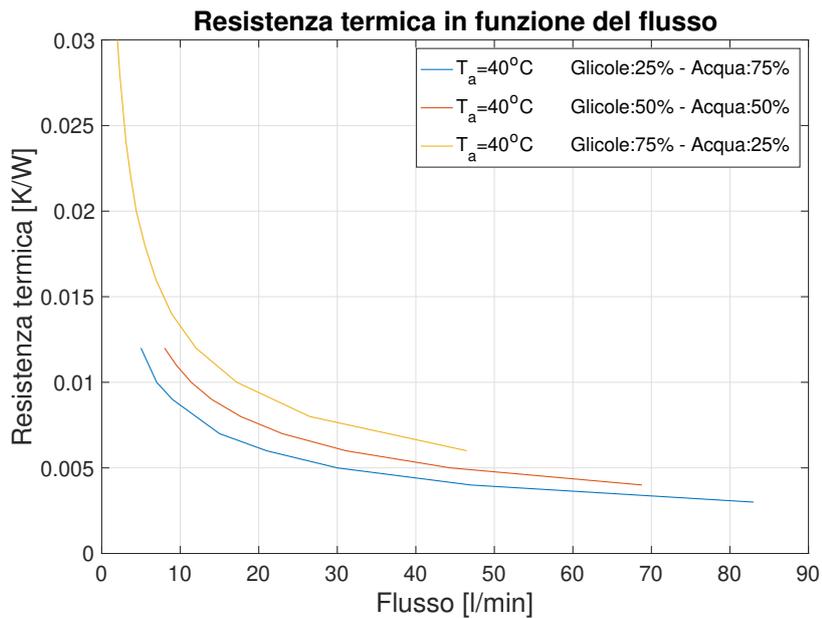


Figura 6.14: Caratteristiche del glicole etilenico nel dissipatore.

Prima di affrontare il modello su Simulink è necessario fare la mappa dei rendimenti del convertitore in funzione della corrente utilizzando un'analisi a regime costante, trascurando i transitori; questa viene effettuata tramite lo strumento di simulazione Plecs con il controllo e circuito termico illustrati in Figura 6.15:

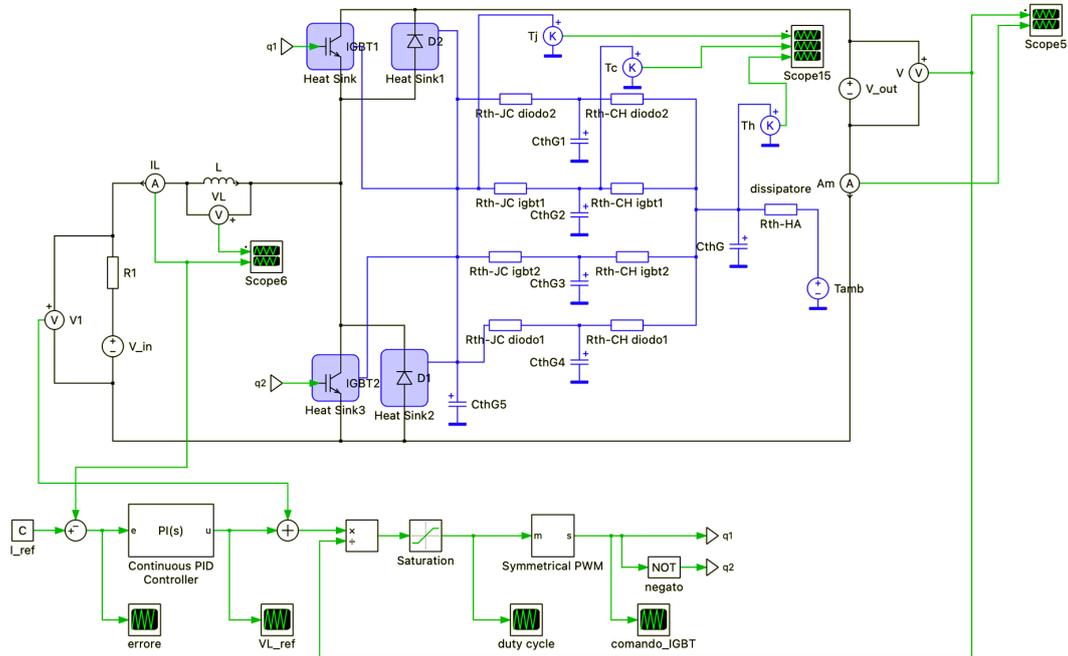


Figura 6.15: Modello elettrico e termico del convertitore utilizzato.

Il controllo regola il tempo di apertura e chiusura dei transistor della gamba del convertitore in modo da avere una regolazione della corrente sull'induttanza, generando un errore tra il riferimento e la corrente misurata; questo, attraverso il regolatore PI e la modulazione PWM genera due segnali di comando opposti ai transistor.

6.2.1 Utilizzo del modulo a IGBT

Il primo approccio è stato quello di utilizzare un solo modulo IGBT (Infineon FZ2400R17HP4-B29) per gamba di commutazione perché la tensione e la frequenza di lavoro sono di medio livello nel campo dell'alta potenza. Lo schema elettrico è mostrato in Figura 6.16 e le caratteristiche sono in Tabella 6.2:

Tabella 6.2: Caratteristiche principali del modulo Infineon FZ2400R17HP4-B29.

IGBT	Condizioni	Valore
V_{CE} [V]	$T_{vj} = 25^{\circ}C$	1700
I_c nom [A]	$T_c = 100^{\circ}C, T_{vj,max} = 175^{\circ}C$	2400
Corrente di picco max rip. I_{CRM} [A]	$t_p = 1ms$	4800
R_{Gint} [Ω]	$T_{vj} = 25^{\circ}C$	0.65
R_{th-JC} [K/kW]	per IGBT	7.74
R_{th-CH} [K/kW]	per IGBT	10.0
T_{vj} operativa [$^{\circ}C$]		-40 : 150
Diodo	Condizioni	Valore
Tensione inversa di picco rip. [V]	$T_{vj} = 25^{\circ}C$	1700
I_F [A]		2400
Tensione diretta [V]	$I_F=2400$ A	1.65
Corrente di picco max rip. I_{FRM} [A]	$t_p = 1ms$	4800
R_{th-JC} [K/kW]	per diodo	10.6
R_{th-CH} [K/kW]	per diodo	11.0
T_{vj} operativa [$^{\circ}C$]		-40 : 150

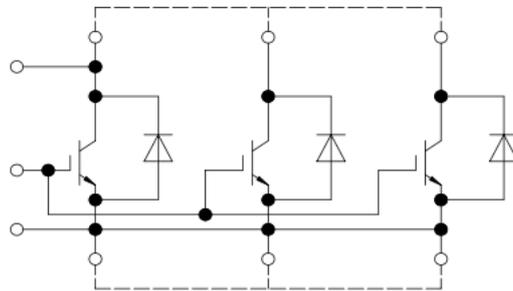


Figura 6.16: Schema elettrico del modulo Infineon FZ2400R17HP4-B29.

Nel modello Ples sono state implementate le curve caratteristiche del diodo e dell'IGBT del modulo scelto, mostrate nelle Figure 6.17 e 6.18

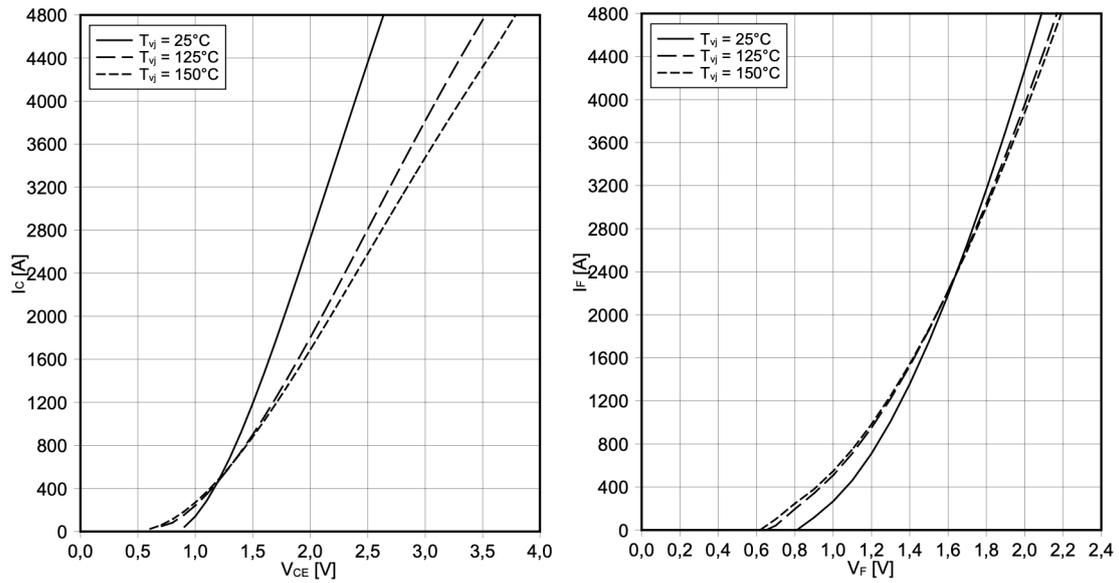


Figura 6.17: Caratteristica di uscita dell'IGBT e diodo.

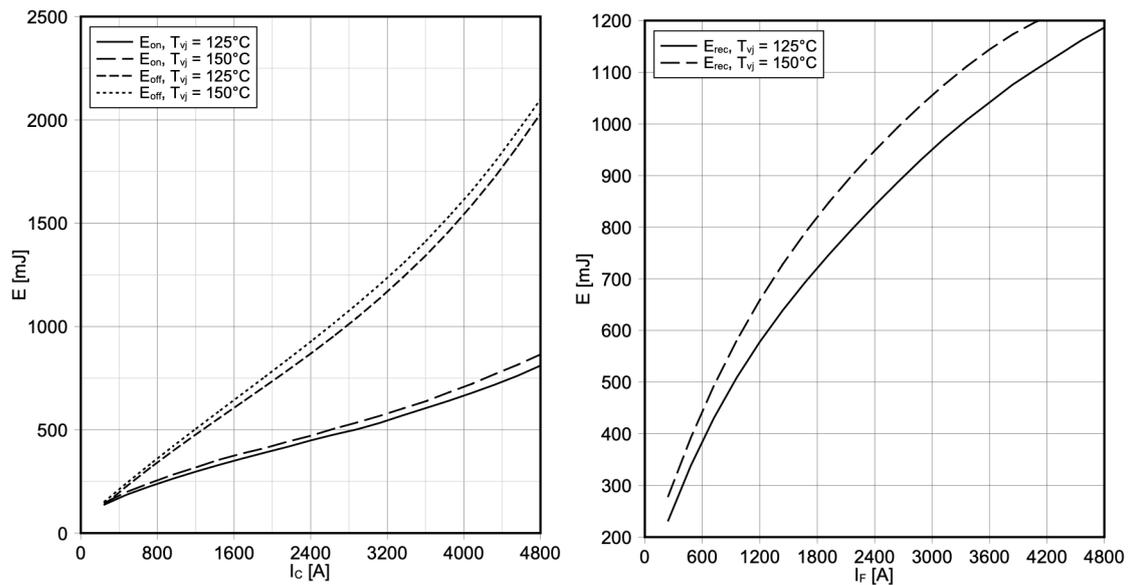


Figura 6.18: Caratteristica delle perdite per commutazione di IGBT e diodo.

Considerando le caratteristiche di uscita dalla batteria HE , le Formule del paragrafo 6.1 dalle quali otteniamo $L=1\text{ mH}$, $K_p=6.3$ e $K_i=3950$, i valori di resistenza termica di Tabella 6.2 e un dissipatore esterno con liquido refrigerante al 25% di glicole ad un flusso di 30 l/min , quindi resistenza termica pari a 0.005 K/W , come mostrato nel grafico di Figura 6.14, si è giunti, attraverso la simulazione con massima corrente di carico, alla

fuga termica dei semiconduttori.

Allora si è proceduto alla riduzione della frequenza di campionamento a 4 kHz e di conseguenza ricalcolati i nuovi valori di K_p e K_i pari a 2.5 e 630; così la temperatura è calata a $128\text{ }^\circ\text{C}$, all'interno della temperatura operativa fornita dal datasheet; il ripple di corrente sull'induttanza è del 5% come visibile dalla Figura 6.19 e le perdite medie corrispondono a 3500 e 1215 W rispettivamente per commutazione e conduzione degli IGBT, invece 2900 e 615 W per la commutazione e conduzione dei diodi.

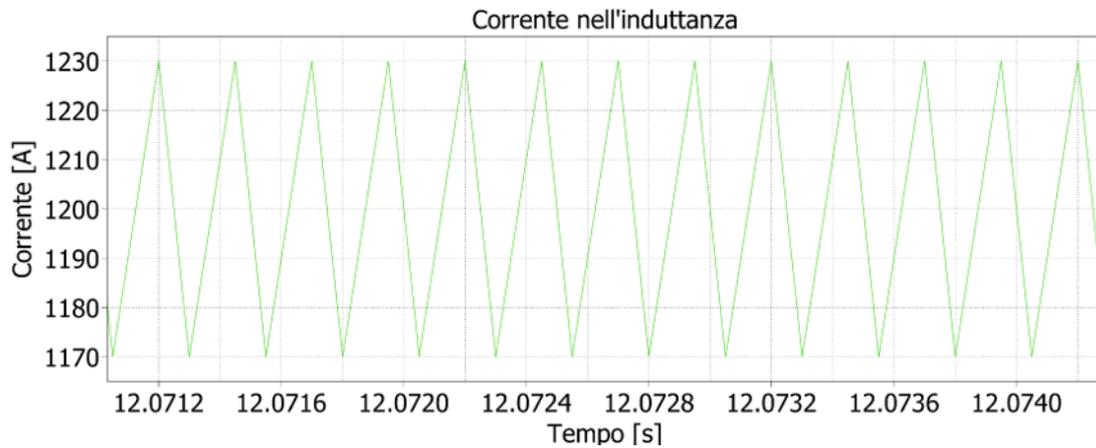


Figura 6.19: Corrente nell'induttanza nel tempo.

Un'ulteriore verifica è stata effettuata mostrando l'andamento del ripple di corrente su più valori d'induttanza in funzione della frequenza, si nota dalla Figura 6.20, ad esempio, che utilizzando il valore di $L=0.5\text{ mH}$ il ripple di corrente ad una frequenza fissata di 4000 Hz è oltre il 15%, non accettabile; invece con una $L=2\text{ mH}$ il ripple viene ridotto, ma questo comporta un ingombro maggiore e delle perdite superiori rispetto ad usare una $L=1\text{ mH}$ in quanto il modello considera l'induttanza ideale, quindi più è grande e con perdite maggiori.

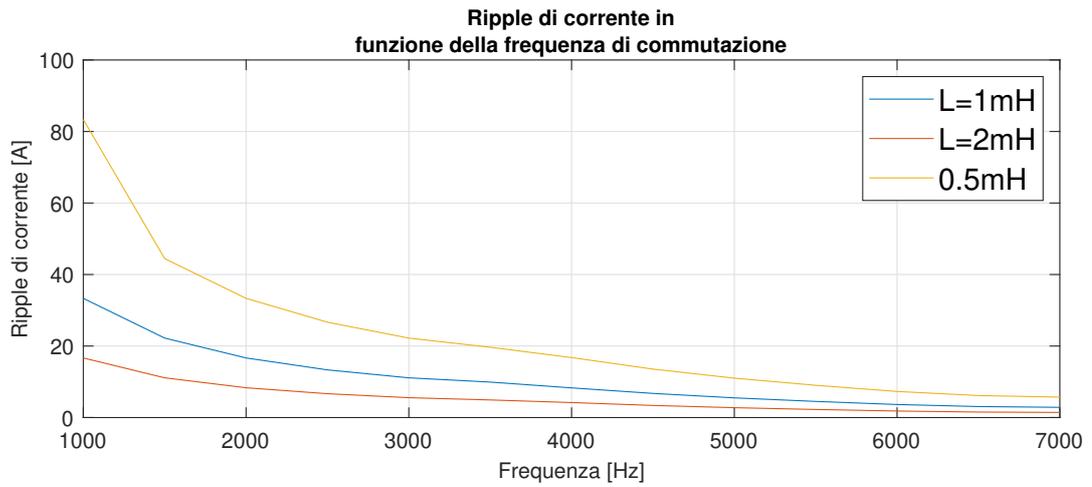


Figura 6.20: Ripple di corrente su più induttanze in funzione della frequenza.

Si è inoltre rappresentata la temperatura di giunzione in funzione della frequenza e, come detto in precedenza, non si può andare oltre i 4 kHz poiché porterebbe a lavorare troppo vicino alla soglia massima operativa imposta dal datasheet.

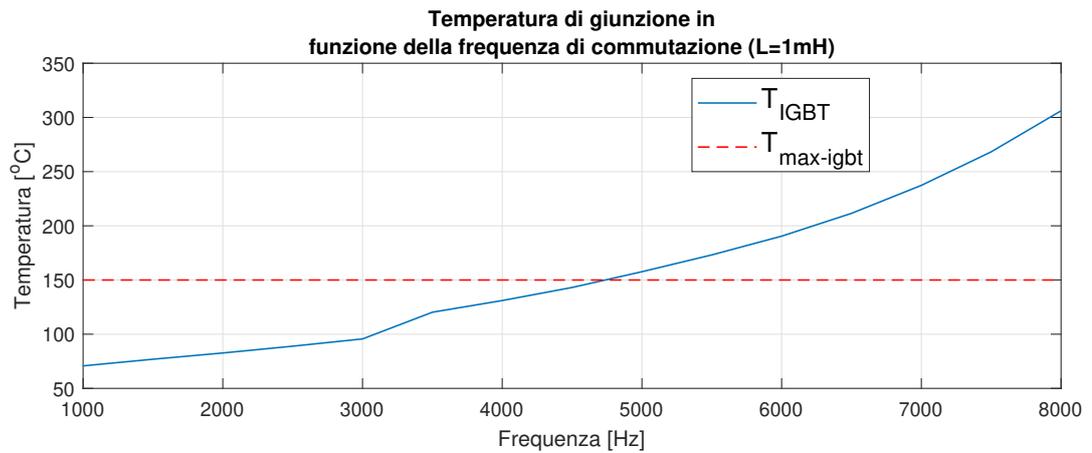


Figura 6.21: Temperatura di giunzione in funzione della frequenza.

Infine considerando le perdite totali di gamba, illustrate in Figura 6.22, si ottiene la mappa di rendimento:

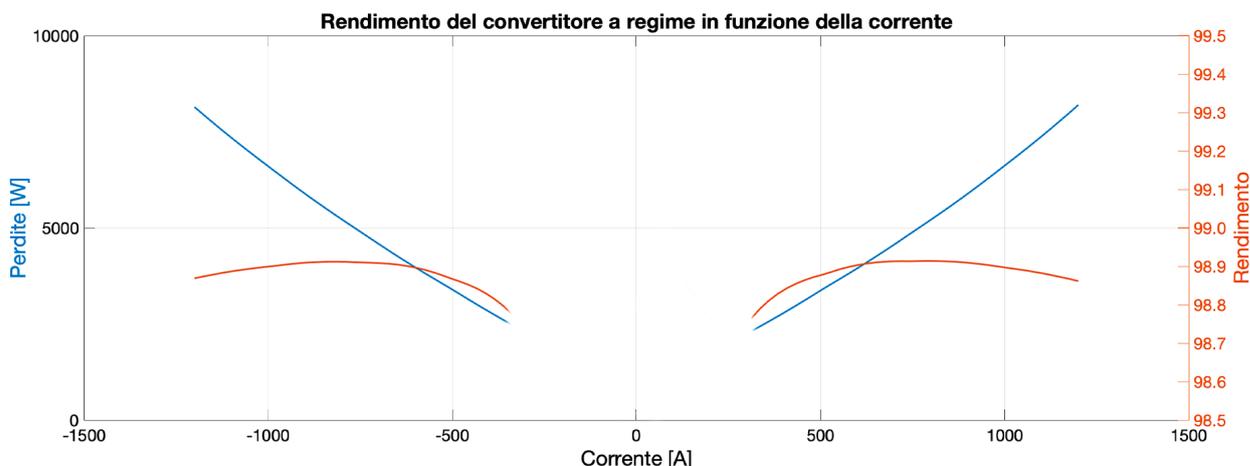


Figura 6.22: Mappa di rendimento del convertitore per la batteria HE.

Il rendimento massimo è pari a 98.9% in corrispondenza di una corrente di 800 A, equivalente al 67% del pieno carico considerato per la batteria in esame.

Lo stesso procedimento è stato effettuato per la batteria *HP*, utilizzando come dati in ingresso per la simulazione, a corrente massima di carico, i valori della Tabella 6.2, lo stesso dissipatore usato in precedenza con resistenza termica di 0.005 K/W, $L=1\text{ mH}$, $K_p=6.3$ e $K_i=3950$ ottenendo di nuovo la fuga termica dei semiconduttori.

Si è proceduto a step:

1. La frequenza è stata ridotta da 10 a 2 kHz e di conseguenza $K_p=1.3$ e $K_i=160$ ottenendo una temperatura di giunzione di 170 °C, ancora superiore alla temperatura operativa massima;
2. si è scelto di aggiungere una seconda gamba di commutazione in parallelo, così da dimezzare la corrente per gamba, riportando la frequenza a 10 kHz, ma la temperatura è risultata comunque troppo elevata;
3. la frequenza è stata nuovamente ridotta a 2 kHz, mantenendo i parametri dello step 1, trovando ad una temperatura di giunzione di 115 °C, e un ripple di corrente del 5% come mostrato in Figura 6.23 e le perdite medie corrispondono a 3470 e 2540 W rispettivamente per commutazione e conduzione degli IGBT, invece 2740 e 1300 W per la commutazione e conduzione dei diodi.

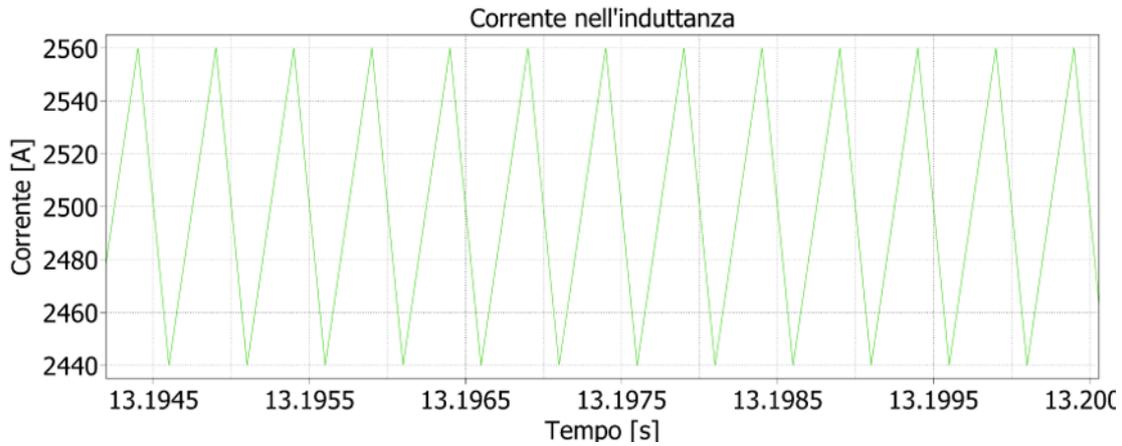


Figura 6.23: Corrente nell'induttanza nel tempo.

Infine considerando le perdite totali di gamba, illustrate in Figura 6.24, si ottiene la mappa di rendimento:

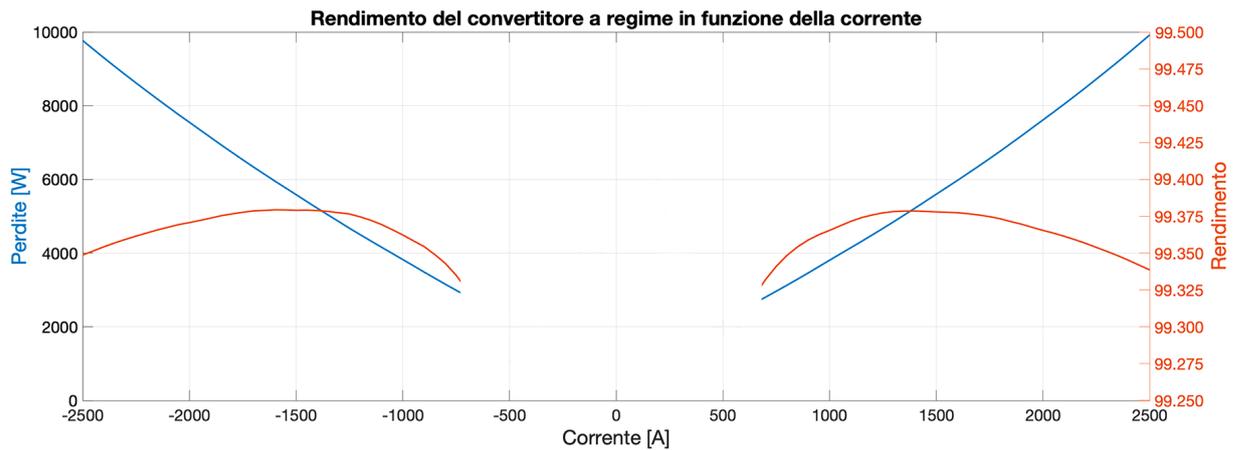


Figura 6.24: Mappa di rendimento del convertitore per la batteria HP.

Il rendimento massimo è pari a 99.4% in corrispondenza di una corrente di 1600 A, equivalente al 64% del pieno carico considerato per la batteria in esame.

6.2.2 Utilizzo del modulo con MOSFET in tecnologia SiC

Dai risultati ottenuti con il modulo a IGBT non si è raggiunta, per via delle alte perdite di commutazione, una frequenza pari a 10 kHz; si è quindi pensato di adottare i MOSFET in tecnologia al carburo di silicio che rispetto ai normali MOSFET possono

funzionare a temperature più elevate, fornire una densità di corrente più elevata, subire perdite di commutazione ridotte e supportare frequenze di commutazione maggiori; ciò significa che anche i MOSFET SiC sono più adatti al medesimo ambito di applicazione degli IGBT.

Pertanto le perdite di commutazione ridotte da sole, significano una generazione di calore molto inferiore, riducendo così i requisiti di gestione termica dei sistemi che utilizzano MOSFET SiC rispetto agli IGBT. Questo porta ad una riduzione dei costi complessivi, nonché ad un design più compatto e leggero; inoltre sono più robusti agli IGBT al silicio.

Il modulo scelto è il Wolfspeed CAB650M17HM3 con le caratteristiche indicate in Tabella 6.3 e schema elettrico riportato in Figura 6.25:

Tabella 6.3: Caratteristiche principali del modulo Wolfspeed CAB650M17HM3.

MOSFET	Condizioni	Valore
V_{DS} [V]	$T_{vj} = 25^{\circ}C$	1700
I_c nom [A]	$T_c = 90^{\circ}C, T_{vj,max} < 175^{\circ}C$	694
Corrente di picco max rip. $I_{D(pulsed)}$ [A]	$t_p = 1ms$	1300
R_{Gint} [Ω]		0.62
R_{th-JC} [K/kW]	per Mosfet	54
T_{vj} operativa [$^{\circ}C$]		-40 : 175
Diodo	Condizioni	Valore
Tensione inversa di picco rip. [V]	$T_{vj} = 25^{\circ}C$	1700
I_F [A]		2400
Tensione diretta [V]	$I_F=650$ A	5.4
Tempo Reverse Recovery [ns]	$I_F=650$ A $V_R=900$ V	83
R_{th-JC} [K/kW]	per diodo	10.6
T_{vj} operativa [$^{\circ}C$]		-40 : 175

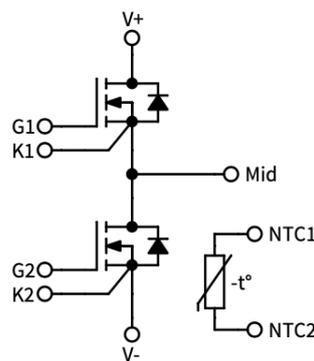


Figura 6.25: Schema elettrico del modulo Wolfspeed CAB650M17HM3.

Le curve caratteristiche del modulo di Figura 6.26 sono state implementate sul modello Plecs per avere una simulazione che tenesse conto delle perdite; non si tiene conto delle perdite di conduzione e turn-on del diodo:

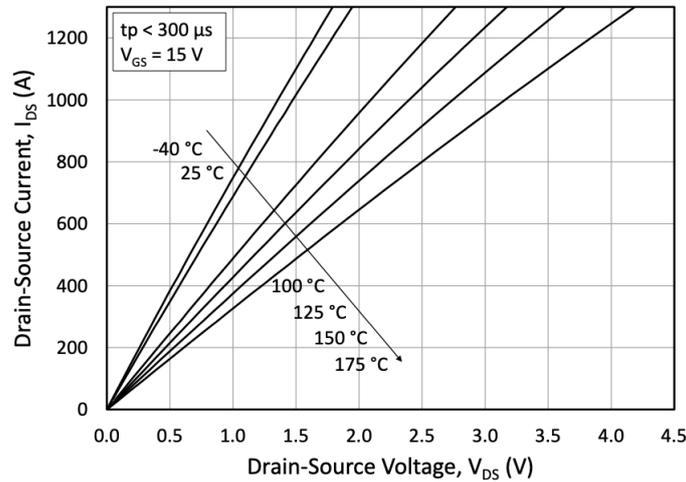


Figura 6.26: Caratteristica di uscita del MOSFET.

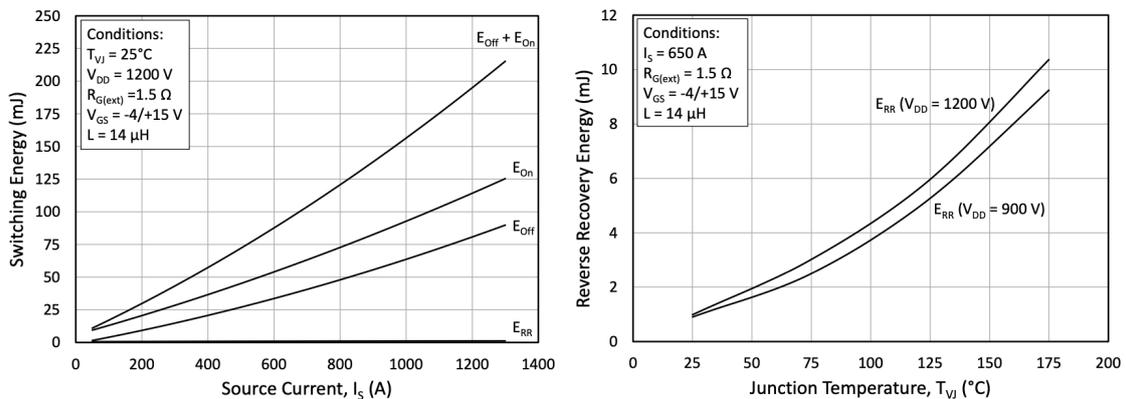


Figura 6.27: Caratteristiche di perdita del MOSFET e diodo.

Considerando la corrente nominale del modulo, non è possibile utilizzare un solo modulo ma almeno due in parallelo per gamba di commutazione.

Valutando le caratteristiche di uscita dalla batteria HE , le Formule del paragrafo 6.1 dalle quali otteniamo $L=0.3 \text{ mH}$, $K_p=1.9$ e $K_i=1190$, i valori di resistenza termica di Tabella 6.3 e un dissipatore esterno con liquido refrigerante al 75% di glicole ad un flusso di 4.5 l/min , quindi di resistenza termica pari a 0.02 K/W , come mostrato nel grafico di Figura 6.14, si è giunti ad una temperatura di giunzione di 116 °C e un ripple di corrente sull'induttanza del 8.3%, come mostrato in Figura 6.28, conforme al

corretto funzionamento del convertitore; le perdite medie corrispondono a 1400 e 800 W rispettivamente per commutazione e conduzione dei MOSFET, invece 0 e 0 W per la commutazione e conduzione dei diodi.

Le perdite sui diodi in questo modulo sono nulle poiché l'IGBT conduce in un solo verso mentre il MOSFET, se pilotato chiuso, conduce in entrambi.

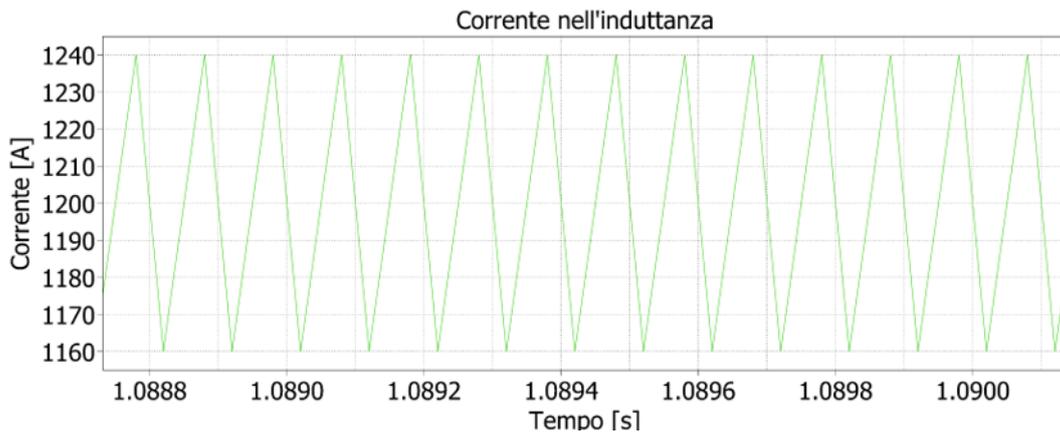


Figura 6.28: Tensione e corrente nell'induttanza nel tempo.

Dalla somma della media delle perdite a regime si definisce la mappa di efficienza del convertitore con i moduli MOSFET:

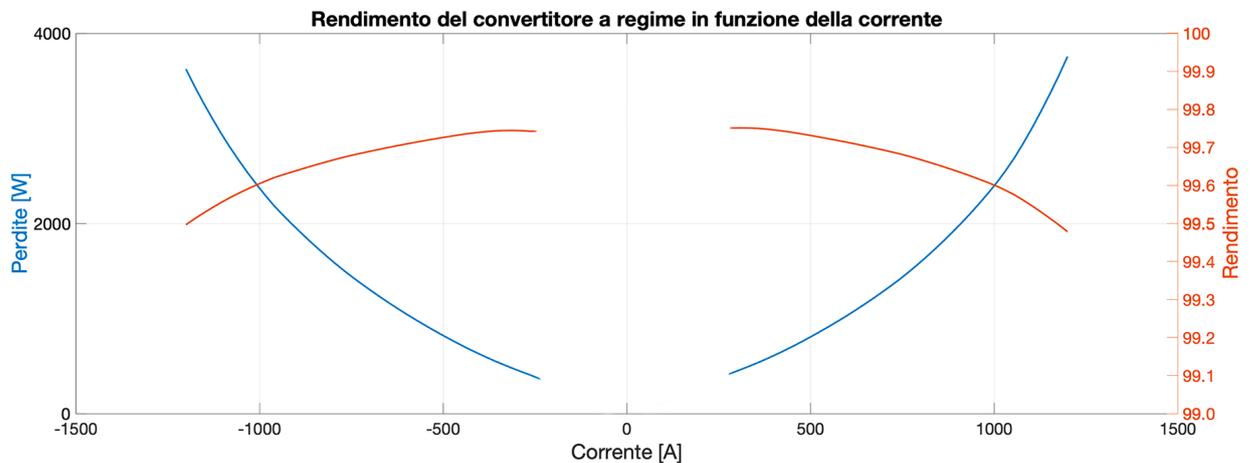


Figura 6.29: Mappa di rendimento del convertitore per la batteria HE.

Il rendimento massimo è pari a 99.75% in corrispondenza di una corrente di 300 A, equivalente al 25% del pieno carico considerato per la batteria in esame.

Lo stesso procedimento è stato effettuato per la batteria *HP*, però con 4 moduli MOSFET SiC in parallelo per gamba. Utilizzando come dati in ingresso per la simulazione, a corrente massima di carico, i valori della Tabella 6.3, un dissipatore con flusso pari a 12 l/min di glicole al 50%, quindi di resistenza termica di 0.01 K/W, $L=0.3$ mH, $K_p=1.9$ e $K_f=1190$ si giunge una temperatura di giunzione di 125 °C. Il ripple di corrente sull'induttanza è di 4%; le perdite medie corrispondono a 2900 e 3800 W rispettivamente per commutazione e conduzione dei MOSFET, invece 0 e 0 W per la commutazione e conduzione dei diodi.

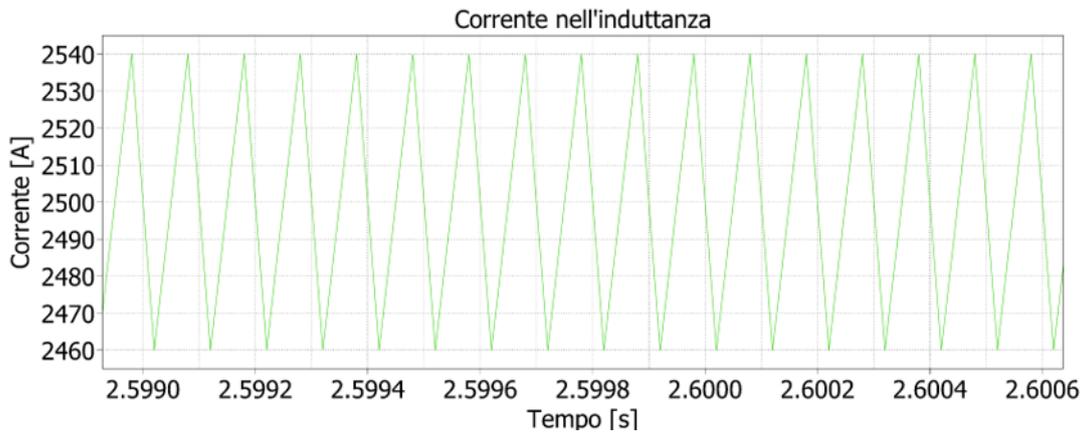


Figura 6.30: Corrente nell'induttanza nel tempo.

Dalla somma della media delle perdite a regime si definisce la mappa di efficienza del convertitore con i moduli MOSFET:

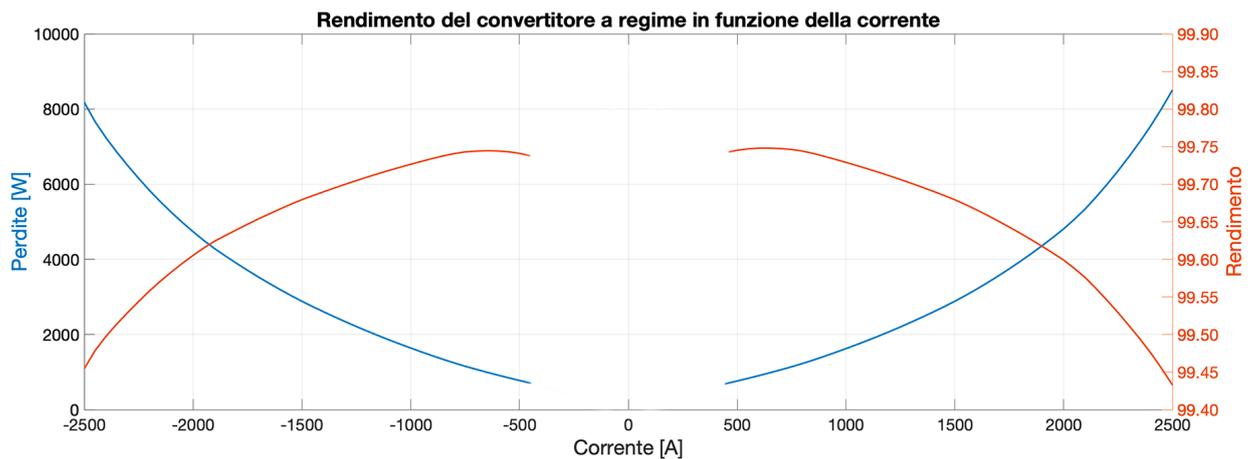


Figura 6.31: Mappa di rendimento del convertitore per la batteria HP.

Il rendimento massimo è pari a 99.75% in corrispondenza di una corrente di 600 A, equivalente al 25% del pieno carico considerato per la batteria in esame.

6.2.3 Riepilogo e confronti

Vengono riportati in Tabella 6.4 i risultati finali ottenuti dalle simulazioni:

Tabella 6.4: Dati riepilogativi dalle simulazioni.

	IGBT HE	IGBT HP	MOSFET HE	MOSFET HP
Moduli	1 x 2400	2 x 2400	2 x 650	4 x 650
I_{max} [A]	1200	2500	1200	2500
Frequenza [kHz]	4	2	10	10
T_{op-max} [$^{\circ}C$]	150	150	175	175
T_j [$^{\circ}C$]	128	115	116	125
L [mH]	1	1	0.3	0.3
ΔI [%]	5.0	5.0	8.3	4.0
K_p	2.5	1.3	1.9	1.9
K_i	630	160	1190	1190
Perdite totali [W]	8230	10.050	2200	6700
Efficienza (I_{max}) [%]	98.85	99.30	99.50	99.45
$R_{th-diss}$ [K/kW]	0.005	0.005	0.02	0.01

Emerge che per le due tecnologie utilizzate, a circa la stessa temperatura di giunzione e ripple di corrente, si hanno differenti di frequenze di lavoro, induttanze e dissipatori. Il modulo con MOSFET in tecnologia SiC spicca per le sue prestazioni e rendimento più elevati rispetto al modulo con gli IGBT, inoltre è l'unico, tra i due scelti, che riesce a soddisfare la frequenza di commutazione scelta a monte del progetto e quindi consente di avere:

- un'induttanza ridotta che in un'applicazione reale significherebbe dimensioni minori;
- un dissipatore di dimensioni ridotte oppure che, a parità di dimensioni, abbia un flusso di liquido refrigerante minore, il che significa avere meno perdite di pressione che vanno ad incidere sullo sforzo della pompa.

Per una migliore visualizzazione vengono riportati nelle Figure 6.32 e 6.33 il confronto grafico dell'andamento dei rendimenti tra IGBT e MOSFET, prima per il convertitore del sistema HE e poi HP.

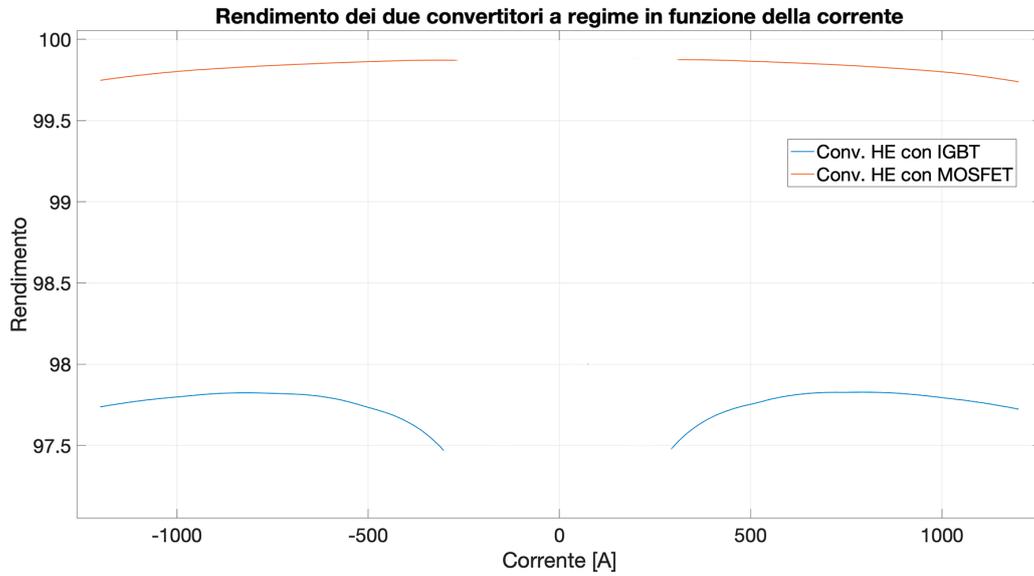


Figura 6.32: Confronto dei rendimenti dei transistor analizzati per il convertitore del sistema HE.

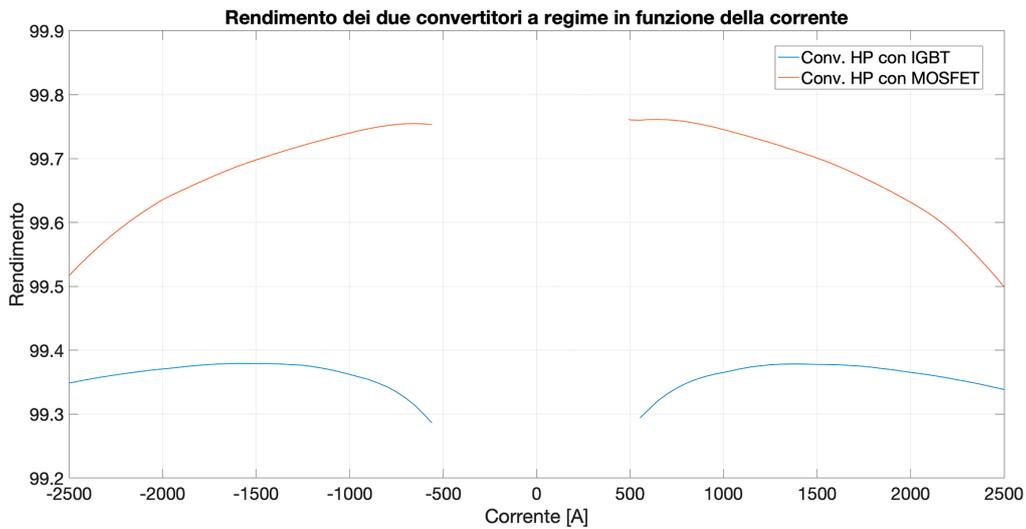


Figura 6.33: Confronto dei rendimenti dei transistor analizzati per il convertitore del sistema HP.

A conferma di quanto ottenuto nel paragrafo precedente e riassunto in Tabella 6.4 si possono raggiungere gli stessi risultati attraverso un approccio alternativo: fissando la temperatura di giunzione, quindi le perdite, il dissipatore ed il ripple di corrente sull'induttanza e da questi confrontare i risultati di induttanza e frequenza ottenuti con

l'utilizzo del modulo a IGBT e quello a MOSFET.

Come esempio sono stati usati i requisiti del convertitore per la batteria *HE*.

Il primo modulo analizzato è stato quello a IGBT mettendo in relazione la temperatura di giunzione con la frequenza di commutazione, considerando le perdite sull'induttanza nulle e quindi non influenti sulla temperatura. Fissando:

- La temperatura di giunzione a $130\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- la resistenza termica del dissipatore a 0.005 K/W ;
- il ripple di corrente al 10%.

Il diagramma è mostrato in Figura 6.34:

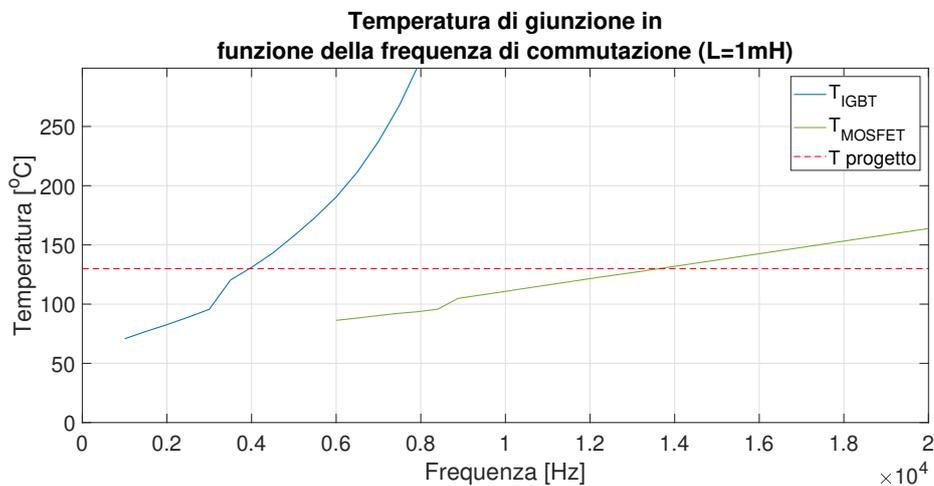


Figura 6.34: Temperatura dei transistor analizzati in funzione della frequenza di commutazione.

La frequenza di commutazione corrispondente a $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ è di 4000 Hz .

Ora si analizza il secondo parametro: il ripple sull'induttanza.

Vengono mostrati in Figura 6.35 gli andamenti del ripple per vari di induttanze in funzione della frequenza:

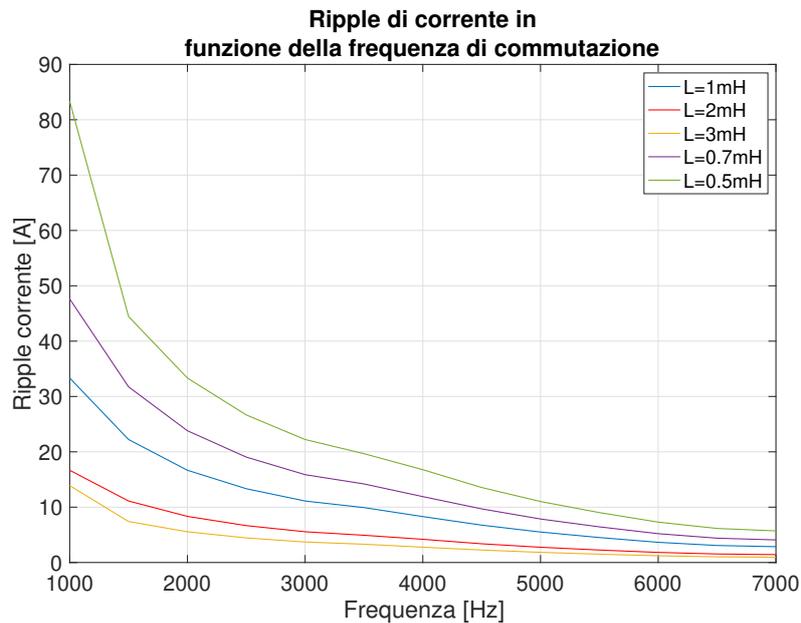


Figura 6.35: Ripple di corrente in funzione della frequenza di commutazione.

Dal grafico, in corrispondenza di 4000 Hz sono possibili induttanze superiori a 1 mH per garantire un ripple di corrente inferiore al 10%; ma considerando un'applicazione reale, tipicamente minore è l'induttanza e minori perdite ci sono, per cui la scelta è ricaduta su quella da 1 mH .

Si passa ora ad esaminare il modulo con MOSFET SiC e, con gli stessi dati fissati in precedenza, si ottiene una frequenza di lavoro di 13.000 Hz come mostrato nella Figura 6.34.

Dal grafico di Figura 6.36, in corrispondenza di 13.000 Hz , sono possibili induttanze superiori a 0.3 mH per garantire un ripple di corrente inferiore al 10%; considerando un'applicazione reale, tipicamente minore è l'induttanza e minori perdite ci sono, per cui la scelta è ricaduta su quella da 0.3 mH .

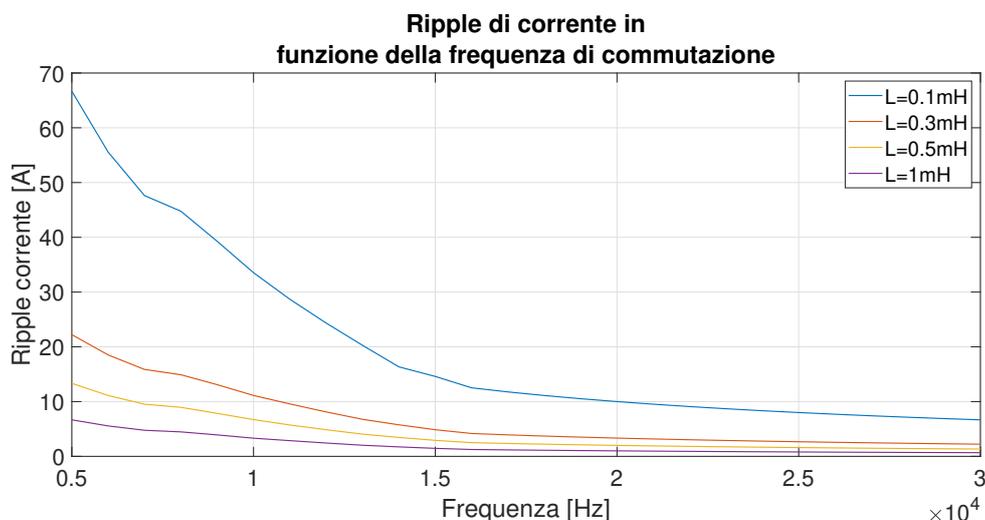


Figura 6.36: Ripple di corrente in funzione della frequenza di commutazione.

Riassumendo, considerando $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ di temperatura sulla giunzione dell'IGBT e del MOSFET, nel primo caso si arriva ad una frequenza di 4000 Hz contro i 13.000 Hz del secondo; il modulo a MOSFET può quindi lavorare a più di 3 volte la frequenza del modulo a IGBT, questo comporta ad avere una larghezza di banda di 400 Hz contro i 1300 Hz .

Avere una banda maggiore comporta ad avere tempi di risposta minori durante la commutazione e quindi minore dissipazione, come mostrato in precedenza. Inoltre avere una banda maggiore comporta ad avere possibilità di taglio delle armoniche a frequenze più bassa dei disturbi.

Spesso nelle applicazioni reali vengono utilizzati dei condensatori in parallelo in ingresso e uscita, nel primo caso per compensare degli effetti parassiti di tipo induttivo che, a causa dell'andamento impulsivo della corrente in ingresso durante la modalità in discesa, potrebbero causare delle sovratensioni; mentre il secondo serve per livellare la tensione in uscita.

- Avendo due frequenze di commutazione diverse, a parità di impedenza, posso avere una capacità minore con una frequenza maggiore;
- minor stress sui componenti reattivi C_{out} , C_{in} e L poiché dalla Formula 6.6 il ripple è inversamente proporzionale alla frequenza di commutazione.

Per la costruzione della batteria *HE* sono stati inseriti 33 moduli, ognuno costituito collegando 48 celle in parallelo e 5 serie di paralleli.

Invece per la batteria *HP* sono stati collegati 33 moduli, ognuno costituito da 50 celle in parallelo e 8 in serie di paralleli.

Tabella 7.1: Caratteristiche principali delle celle scelte

	Batteria HE	Batteria HP
Capacità max [Ah]	50	23
V_{nom} [V]	3.65	2.3
C_{rate}	1	4
R_{int} [mΩ]	0.7	1.2
Peso [kg]	0.885	0.55

Nel modello del convertitore *HE* e *HP* sono state implementate le mappe di rendimento calcolate su Plects utilizzando i moduli a Mosfet SiC. Il controllo del convertitore utilizza come retroazione la corrente sull'induttanza, come mostrato in Figura 7.1.

Come riferimento viene riportato il profilo di potenza calcolato tramite Matlab:

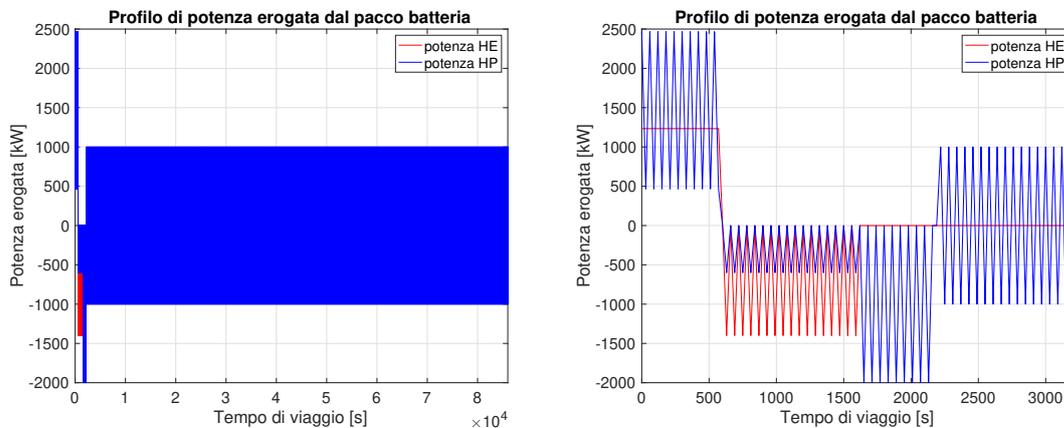


Figura 7.2: Profilo di potenza dei pacchi batterie

I risultati ottenuti sono di seguito descritti, il range temporale è limitato intorno a 3500 s perché dagli istanti temporali successivi gli andamenti mantengono la ripetitività e andrebbero solo a peggiorare la visualizzazione dei grafici.

In Figura 7.3 sono mostrate le tensioni in uscita dalle batterie *HE* e *HP*. Si può notare che per *HE* la tensione, nel tratto iniziale, non è 600 V ma 545 V, questo è dovuto alla resistenza interna della batteria, non considerata su Matlab ma utilizzata sul modello Simulink.

Nel tratto successivo la differenza di potenziale supera i 600 V poiché siamo in un range di rigenerazione e per fare fluire la corrente nel verso opposto è necessario avere una tensione maggiore rispetto a quella che fornisce la batteria.

In uscita dal convertitore invece la tensione è fissa a 1000 V.

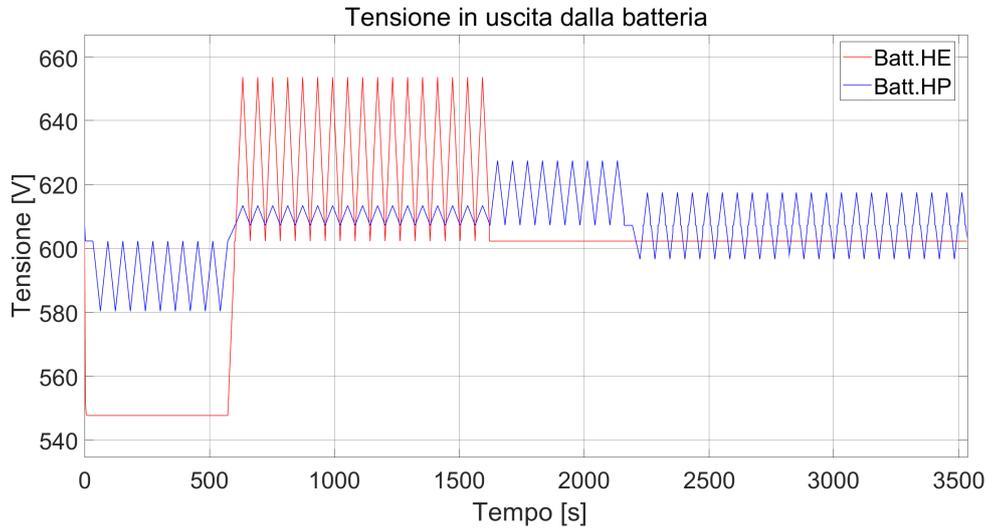


Figura 7.3: Andamento della tensione di uscita dalle batterie

In Figura 7.4 viene mostrato l'andamento della corrente in uscita dalla batteria, ossia in ingresso al convertitore ed in Figura 7.5 è riportata la corrente in uscita da esso, cioè sul carico:

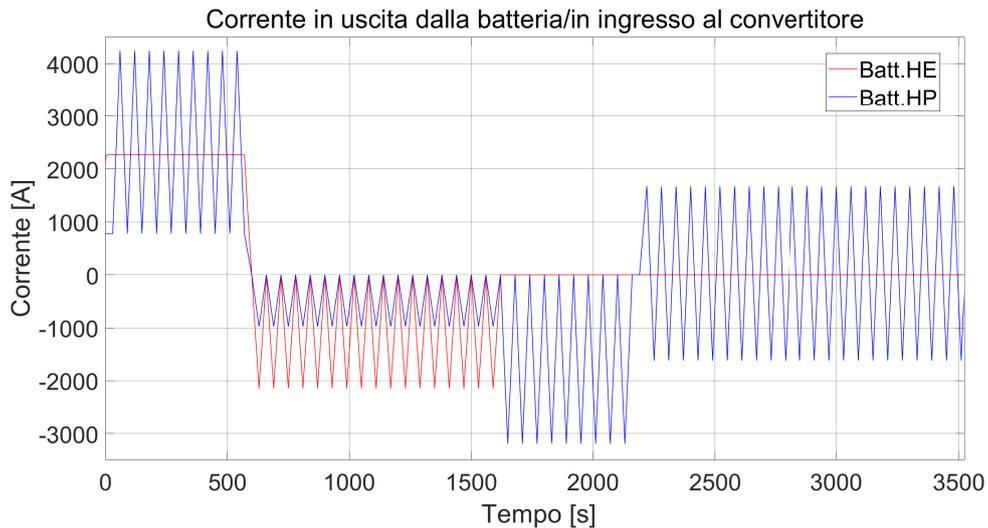


Figura 7.4: Andamento della correnti nelle batterie

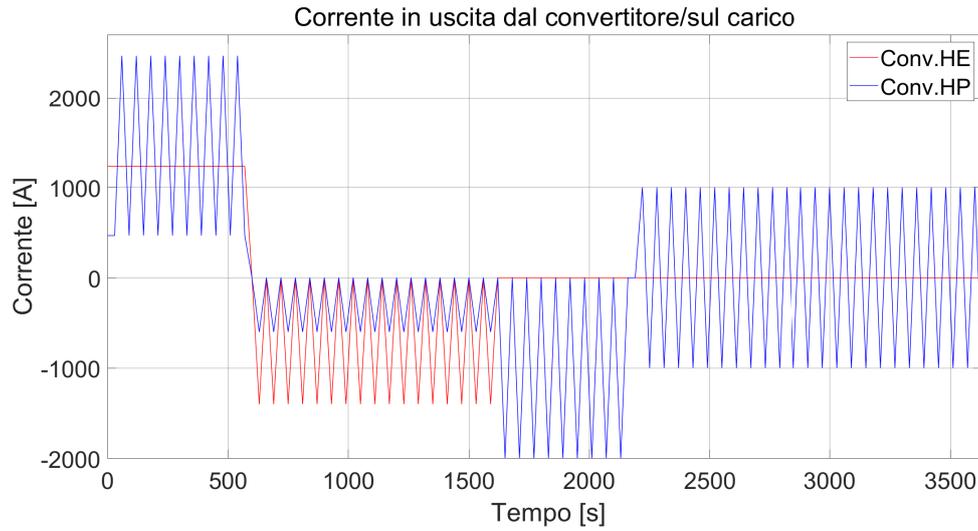


Figura 7.5: Andamento della correnti sul carico

Si possono notare due valori differenti di corrente in ingresso ed uscita dal convertitore, ciò è dovuto alla conservazione della potenza tra ingresso e uscita a meno delle perdite. Le perdite dei pacchi batteria e dei convertitori vengono riportati rispettivamente in Figura 7.6 e 7.7:

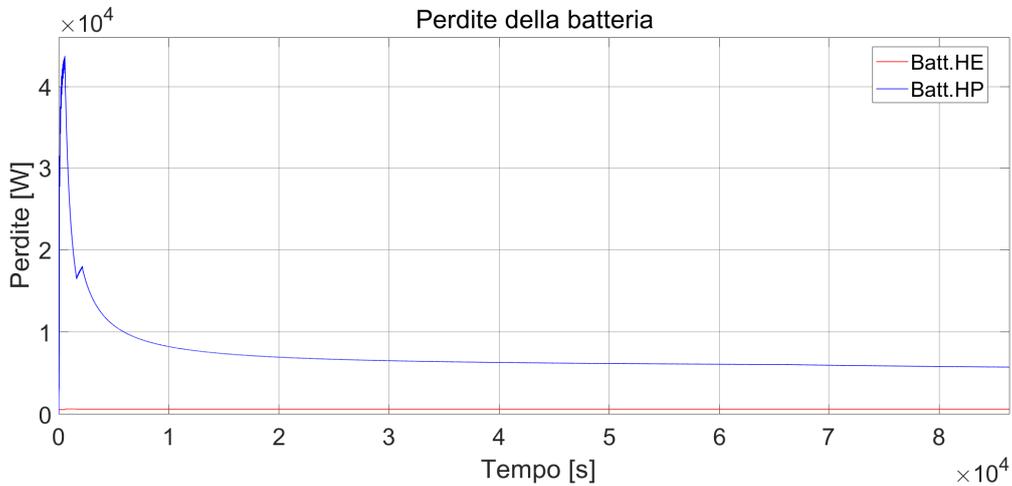


Figura 7.6: Andamento delle perdite nelle batterie

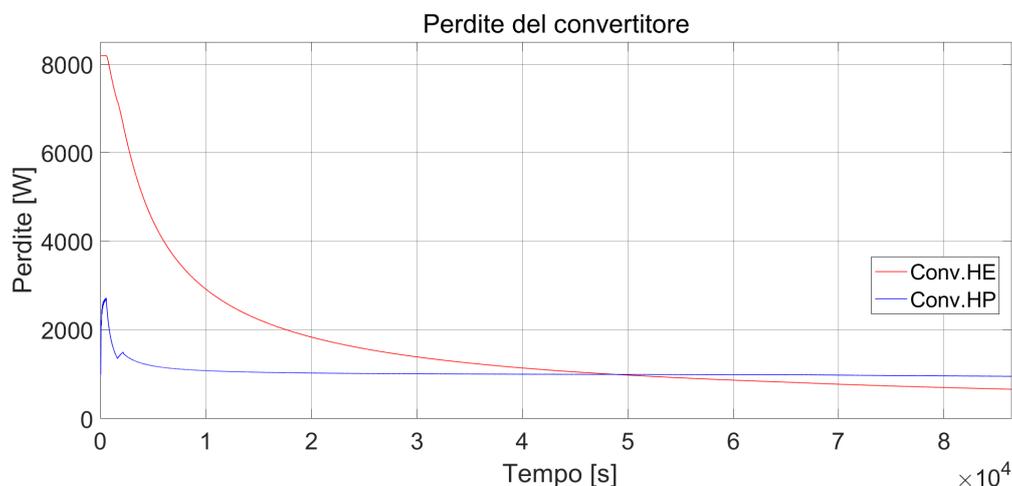


Figura 7.7: Andamento delle perdite nel convertitore

L'andamento dello stato di carica delle batterie è riportato in Figura 7.8; si vede che la batteria *HP* ha una curva tendenzialmente decrescente dovuta alle perdite, non considerate nel modello Matlab, che non vengono compensate tramite la ricarica perché la priorità di rigenerazione è assegnata alla batteria *HE* e solo in caso di esubero l'energia verrebbe trasferita verso quella *HP*.

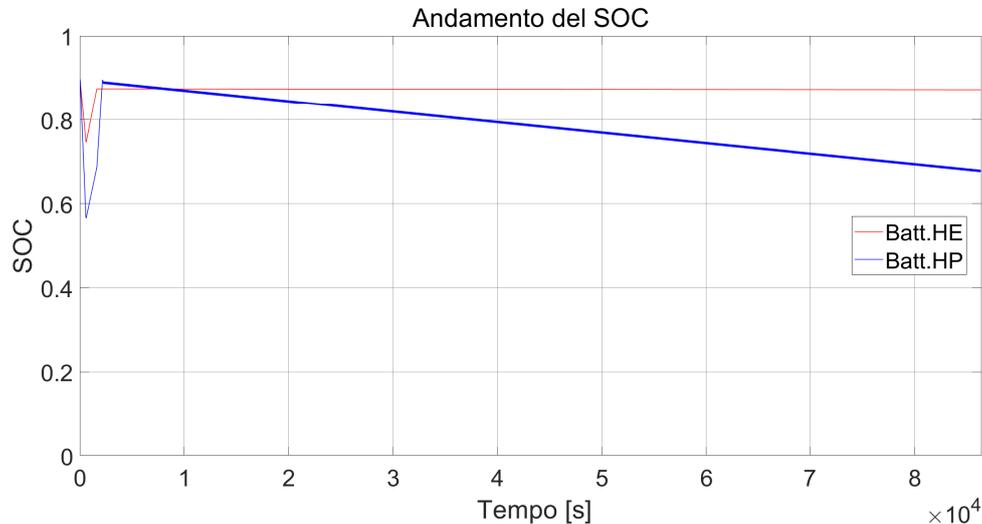


Figura 7.8: Andamento del SOC delle batterie

Gli andamenti dei sistemi *HE*, *HP* e totale sono illustrati nella Figura 7.9 e si rileva che il rendimento del sistema *HE* è minore di quello *HP* dovuto al fatto che la resistenza equivalente interna delle celle ad alta energia sono maggiori rispetto a quelle ad alta potenza, conseguenza del numero e costituzione dei moduli.



Figura 7.9: Rendimento globale e dei sistemi HE e HP

Capitolo 8

Conclusioni

L'obiettivo è quello di elettrificare un'imbarcazione senza l'utilizzo di energia proveniente da combustibili fossili, nell'ambito del progetto si tratta di dimensionare un pacco batteria ibrido ed i relativi convertitori.

In particolare la mia tesi contribuisce con i seguenti punti:

1. Un codice Matlab che, in base al profilo di carico e rigenerazione fornito, restituisce la configurazione ottimale, in base ai costi, tra la batteria ad alta energia *HE* e quella ad alta potenza *HP*, integrando anche un controllo della gestione della ricarica:
 - Inizialmente con priorità di ricarica verso la batteria *HE*;
 - ho provato ad invertire la priorità di ricarica, considerando il costo maggiore delle batterie ad alta potenza, ottenendo dei costi minori.
2. Ottenuti i profili di carica e scarica delle batterie ho proceduto alla modellizzazione dei convertitori bidirezionali, dapprima confrontando, con induttanza ideale, le mappe di efficienza calcolate su Plecs:
 - In principio con moduli di potenza con IGBT;
 - una volta verificato che i risultati non hanno rispettato i parametri di progetto, ho utilizzato i moduli con MOSFET in tecnologia SiC;
3. ho implementato su Simulink le caratteristiche di potenza di uscita dalle batterie e le mappe di rendimento dei convertitori, ottenendo gli andamenti di tensione, corrente, potenza e perdite dell'intero sistema studiato.

Dalla simulazione finale si nota che i rendimenti dei sistemi elettrici, soprattutto nel campo dell'alta potenza, sono i più alti al mondo, quindi permettono di avere costi minori sul lato della dissipazione del calore e altri vantaggi come il trasporto dell'energia.

Bibliografia

- [1] Jeroen Stuyts Mohsen Akbarzadeh Jasper De Smet. «Cost assessment of battery hybrid energy storage system for full-electric marine applications». In: *IEEE* (2022).
- [2] Muhammad Umair Mutarraf et al. «Energy storage systems for shipboard micro-grids—A review». In: *Energies* 11.12 (2018), p. 3492.
- [3] Haisheng Chen et al. «Progress in electrical energy storage system: A critical review». In: *Progress in natural science* 19.3 (2009), pp. 291–312.
- [4] Maria C Argyrou, Paul Christodoulides e Soteris A Kalogirou. «Energy storage for electricity generation and related processes: Technologies appraisal and grid scale applications». In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 94 (2018), pp. 804–821.
- [5] Haoran Zhao et al. «Review of energy storage system for wind power integration support». In: *Applied energy* 137 (2015), pp. 545–553.
- [6] Aikaterini Chatzivasileiadi, Eleni Ampatzi e Ian Knight. «Characteristics of electrical energy storage technologies and their applications in buildings». In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 25 (2013), pp. 814–830.
- [7] Jian Cao e Ali Emadi. «A New Battery/UltraCapacitor Hybrid Energy Storage System for Electric, Hybrid, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles». In: *IEEE Transactions on Power Electronics* 27.1 (2012), pp. 122–132. DOI: 10.1109/TPEL.2011.2151206.
- [8] Yichao Tang e Alireza Khaligh. «On the feasibility of hybrid Battery/Ultracapacitor Energy Storage Systems for next generation shipboard power systems». In: *2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. 2010, pp. 1–6. DOI: 10.1109/VPPC.2010.5729211.
- [9] Jun Hou, Jing Sun e Heath F. Hofmann. «Mitigating Power Fluctuations in Electric Ship Propulsion With Hybrid Energy Storage System: Design and Analysis». In: *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 43.1 (2018), pp. 93–107. DOI: 10.1109/JOE.2017.2674878.

- [10] Hamoud Alafnan et al. «Stability Improvement of DC Power Systems in an All-Electric Ship Using Hybrid SMES/Battery». In: *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 28.3 (2018), pp. 1–6. DOI: 10.1109/TASC.2018.2794472.
- [11] Jun Hou, Jing Sun e Heath Hofmann. «Control development and performance evaluation for battery/flywheel hybrid energy storage solutions to mitigate load fluctuations in all-electric ship propulsion systems». In: *Applied energy* 212 (2018), pp. 919–930.
- [12] Jun Hou, Jing Sun e Heath Hofmann. «Battery/flywheel Hybrid Energy Storage to mitigate load fluctuations in electric ship propulsion systems». In: *2017 American Control Conference (ACC)*. IEEE. 2017, pp. 1296–1301.
- [13] M. Sander; R. Gehring; H. Neumann; T. Jordan. «LIQHYSMES STORAGE UNIT - HYBRID ENERGY STORAGE CONCEPT COMBINING LIQUEFIED HYDROGEN WITH SUPERCONDUCTING MAGNETIC ENERGY STORAGE». In: *Hydrogen Tools* 37 (2012), pp. 14300–14306. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.07.019.
- [14] MC Kisacikoglu, M Uzunoglu e MS Alam. «Load sharing using fuzzy logic control in a fuel cell/ultracapacitor hybrid vehicle». In: *International journal of hydrogen energy* 34.3 (2009), pp. 1497–1507.
- [15] Vicente Roda et al. «Remodeling of a commercial plug-in battery electric vehicle to a hybrid configuration with a PEM fuel cell». In: *International Journal of Hydrogen Energy* 43.35 (2018). VI Symposium on Hydrogen, Fuel Cells and Advanced Batteries – HYCELTEC 2017, 19-23 June 2017, Porto, Portugal, pp. 16959–16970. ISSN: 0360-3199. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.12.171>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319917348929>.
- [16] Pan Zhao, Yiping Dai e Jiangfeng Wang. «Design and thermodynamic analysis of a hybrid energy storage system based on A-CAES (adiabatic compressed air energy storage) and FESS (flywheel energy storage system) for wind power application». In: *Energy* 70 (2014), pp. 674–684.
- [17] Sylvain Lemofouet e Alfred Rufer. «Hybrid energy storage system based on compressed air and super-capacitors with maximum efficiency point tracking (MEPT)». In: *IEEE Transactions on Industry Applications* 126.7 (2006), pp. 911–920.
- [18] Michele Pastorelli, Salvatore Musumeci e Fabio Mandrile. «Battery Sources and Power Converters Interface in Waterborne Transport Applications». In: *2021 AEIT International Conference on Electrical and Electronic Technologies for Automotive (AEIT AUTOMOTIVE)*. 2021, pp. 1–5. DOI: 10.23919/AEITAUTOMOTIVE52815.2021.9662776.

-
- [19] Xianqiang Bao et al. «Optimal sizing of battery energy storage system in a shipboard power system with considering energy management optimization». In: *Discrete Dynamics in Nature and Society* 2021 (2021).
- [20] Muhammad Umair Mutarraf et al. «Hybrid Energy Storage Systems for Voltage Stabilization in Shipboard Microgrids». In: *2019 9th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES)*. 2019, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICPES47639.2019.9105604.
- [21] J. Mei, Eric K. W. Cheng e Y. C. Fong. «Lithium-titanate battery (LTO): A better choice for high current equipment». In: *2016 International Symposium on Electrical Engineering (ISEE)*. 2016, pp. 1–4. doi: 10.1109/EENG.2016.7846362.
- [22] Dev Paul. «A History of Electric Ship Propulsion Systems [History]». In: *IEEE Industry Applications Magazine* 26.6 (2020), pp. 9–19. doi: 10.1109/MIAS.2020.3014837.
- [23] Dai-Duong Tran et al. «An Evaluation Study of Hybrid Energy Storage System for Plug-In Hybrid Electric Buses». In: *2017 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. 2017, pp. 1–7. doi: 10.1109/VPPC.2017.8330861.
- [24] Guishi Wang et al. «A Review of Power Electronics for Grid Connection of Utility-Scale Battery Energy Storage Systems». In: *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 7.4 (2016), pp. 1778–1790. doi: 10.1109/TSTE.2016.2586941.
- [25] Thomas Zimmermann et al. «Review of system topologies for hybrid electrical energy storage systems». In: *Journal of Energy Storage* 8 (2016), pp. 78–90.
- [26] HV Venkatasetty e YU Jeong. «Recent advances in lithium-ion and lithium-polymer batteries». In: *Seventeenth Annual Battery Conference on Applications and Advances. Proceedings of Conference (Cat. No. 02TH8576)*. IEEE. 2002, pp. 173–178.