

Modelli per integrazione di celle a combustibile PEM e idruri metallici sulla prima nave italiana con propulsione a idrogeno (ZEUS)

Ing. Massimo Rivarolo, PhD

massimo.rivarolo@unige.it

Progetto TecBia (2018 – 2022)

TPG-UNIGE è partner nel Progetto Nazionale **TecBIA** (2018-2022), con l'obiettivo di progettare, costruire e testare la prima imbarcazione italiana con propulsione con fuel cells a idrogeno, la **ZEUS (Zero Emission Ultimate Ship)**:

- Lunghezza **25 metri**, peso **170 tonnellate**
- **142 kW Fuel Cells** di tipo PEM (2x71 kW)
- Stoccaggio H2 a bordo in **idruri metallici (50 kg)**
- **160 kWh** di batterie a ioni di litio



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI
DI GENOVA



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI "FEDERICO II"
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CHIMICA,
DEI MATERIALI E DELLA PRODUZIONE INDUSTRIALE



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PALERMO



Progetto TecBia: ruolo TPG - UNIGE

- Ricerca di mercato PEMFC per applicazioni marittime (D1.1)
- Ricerca di mercato idruri metallici (D2.1)
- Sviluppo di un modello dinamico di idruri metallici (D2.4) e di FC (D2.4)
- Analisi dinamica integrata del sistema idruri metallici –FC e gestione termica (D4.8)
- Supporto nello sviluppo di protocolli di prova e test a terra del sistema FC + batterie (D5.4)

Attività UNIGE si sono concluse alla fine di aprile 2022 (M33).


		Anno 1												Anno 2												Anno 3													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36		
OR 1		[Activity bar]																																					
A 1.1	UNIGE	[Activity bar]			D1.1																																		
OR 2		[Activity bar]																																					
A 2.2	UNIGE	[Activity bar]			D2.1																																		
A 2.4	UNIGE													[Activity bar]												D2.4													
OR 4		[Activity bar]																																					
A 4.4	Fincantieri													[Activity bar]																									
A 4.5	UNIGE													[Activity bar]																									
A 4.6	HZG													[Activity bar]																									
OR 5		[Activity bar]																																					
A 5.4	UNIGE																														[Activity bar]							D5.4	

Scelta della Fuel Cell


Sulla base dei requisiti individuati, si è proceduto ad effettuare un'analisi comparativa delle diverse soluzioni disponibili.

Al termine della valutazione, si è effettuata la scelta dei 4 stack migliori, sulla base del punteggio complessivo.

	Requisito	Ballard	Hydrogenics	NedStack	Nuvera	Power Cell	Proton Motor
		FC velocity®-MD	HyPM-HD30	FCS 10-XXL	Orion®	MS-30	HyRange®38
Potenza	25 - 40 kW	30	31	40 (4 x 10)	30	30 (netta)	31,5 (netta)
Ore operative	20000	> 20000	15000	24000	12000	20000	20000
Efficienza	>45% @1A/cm2	45%	55% Max	42,9% (max > 50%)	-	38% (max 53%)	48%
Salinità	≥ 0.0015 ppm	sino a 0,0020	-	-	-	0,0015	OK
Inclinazione		-	-	-	-	OK	OK (se verticale)
Purezza H2	≤ 99,995%	99,995%	-	99,5%	-	99,95%	99,995%
Pressione di ingresso H2	≤ 3.5 bar a	8-9 bar a	6.53-9.28 bar a	1.5 bar a	9 bar a	8-12 bar g	6 bar g
Temperatura uscita refrigerante	≥ 70 °C	70	50-70	65-70	75-89	80	72

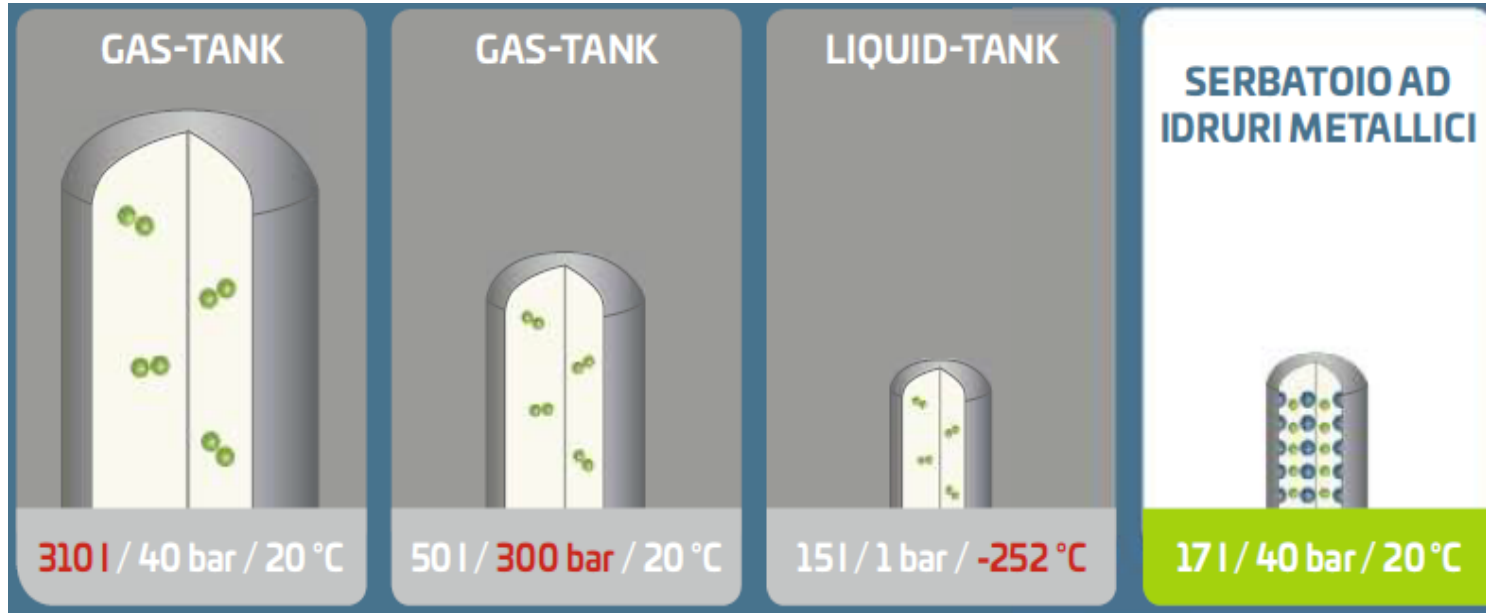
 Requisito pienamente soddisfatto

 Requisito soddisfatto solo in parte

 Requisito non considerato

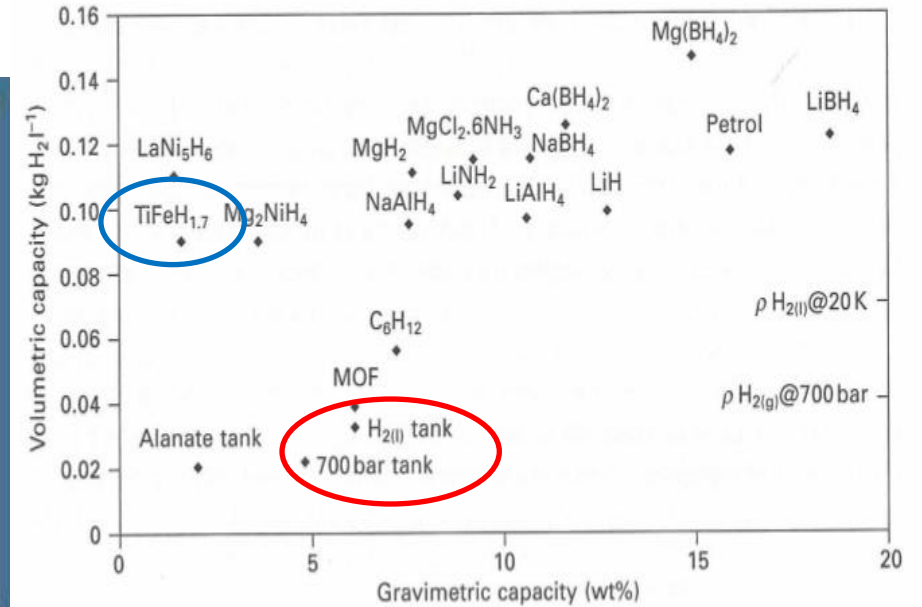
Bonus completezza fornitura		include compressore e raffreddamento	include pompa e blower	include blower		include compressore e raffreddamento	include compressore e raffreddamento
Altri bonus		Curva caratteristica		curva caratteristica e prestazioni a inizio e fine vita	Curva caratteristica	curva caratteristica	curva caratteristica.

Stoccaggio H2 – idruri metallici



	CH2	LH2	MH
Pressione	200 – 700 bar	< 10 bar	1 – 30 bar
Temperatura	Ambiente	-253 °C	Ambiente
Densità volum.	≤ 40 kg/m ³	70 kg/m ³	50 – 80 kg/m ³
Peso	Medio	Ridotto	Alto
Consumo di energia	Alto (10-15%)	Molto alto (30%)	Ridotto

<http://FuelCellIndustryReview.com>.



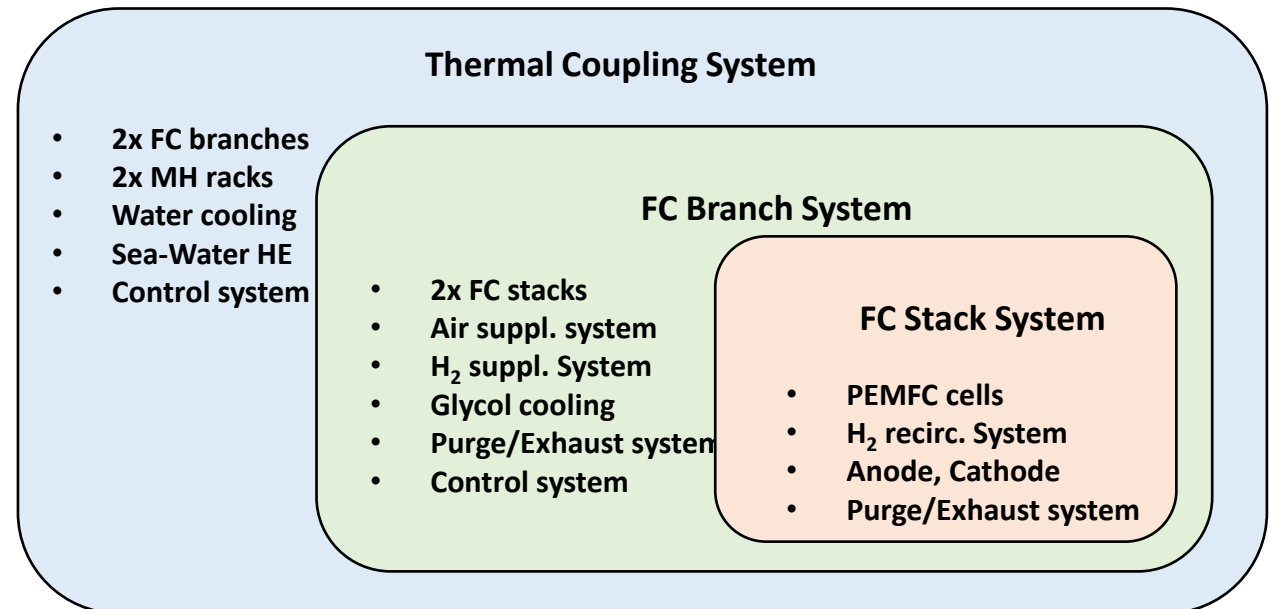
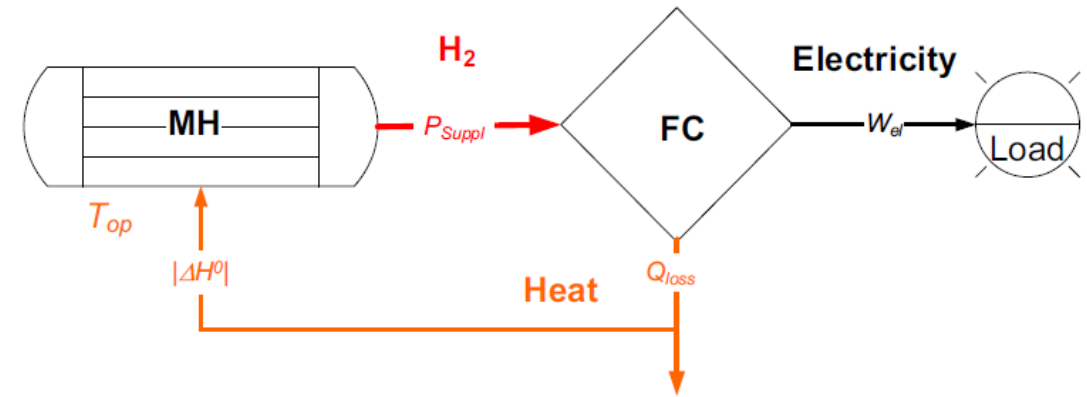
IDRURI METALLICI:

- Buona densità di energia in volume.
- Molto pesanti, bassa densità di energia in termini di peso.
- Ottima potenzialità per applicazioni di tipo navale.

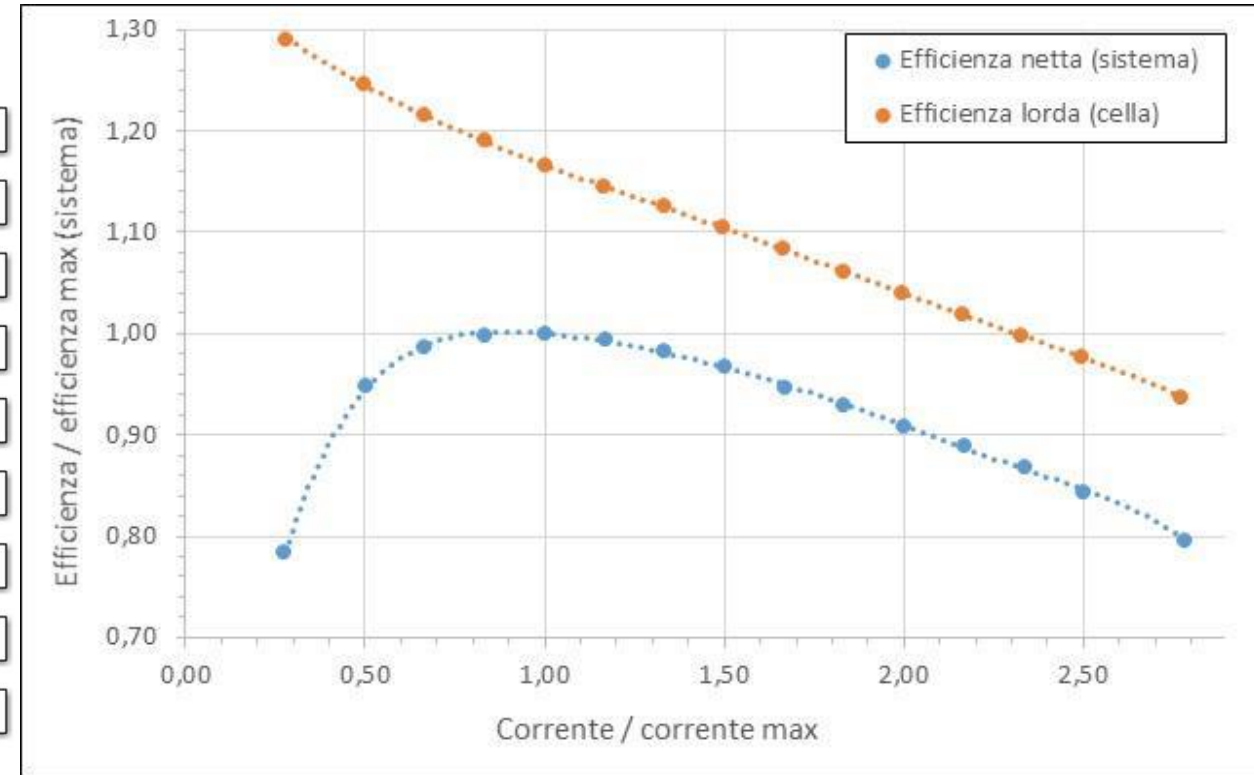
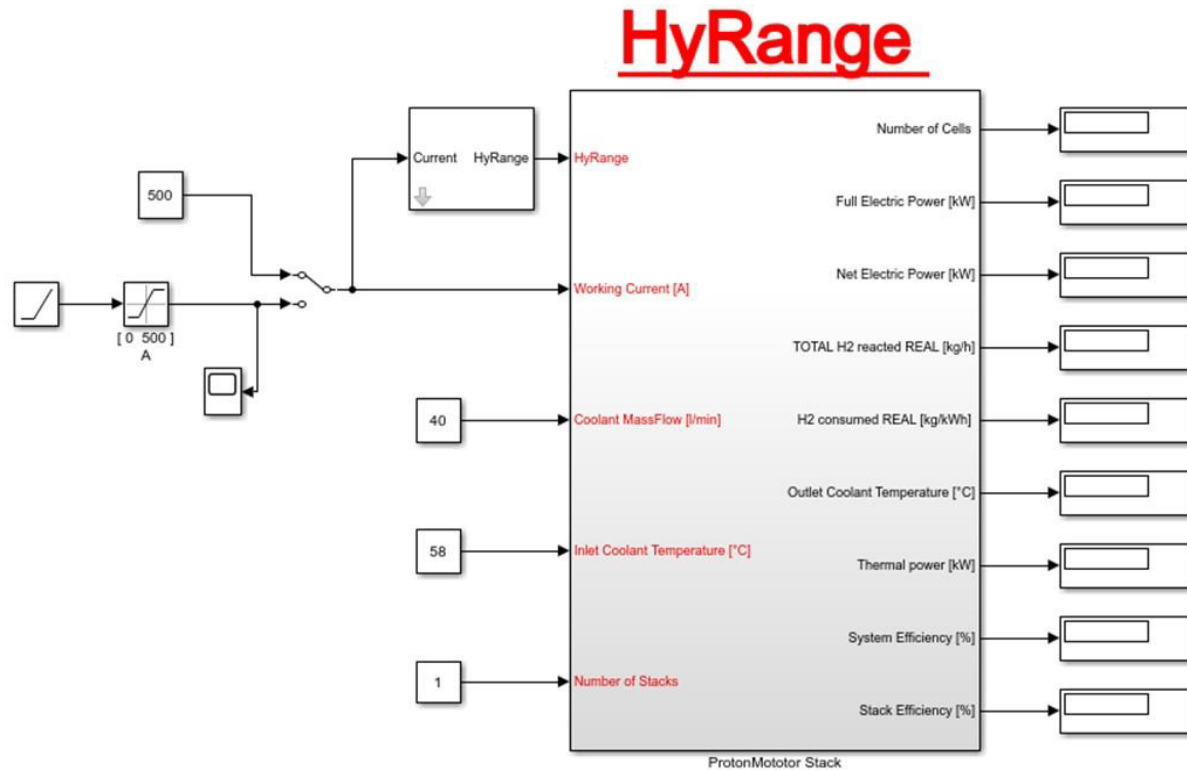
Integrazione FC – idruri a bordo

Il sistema di propulsione a celle a combustibile - idruri metallici permette di:

- soddisfare il fabbisogno di energia elettrica della ZEUS, garantendo una propulsione a zero emissioni di CO₂
- recuperare il calore dalla FC e attivare il rilascio dell'idrogeno dagli idruri (MH)
- aumentare l'efficienza complessiva del sistema

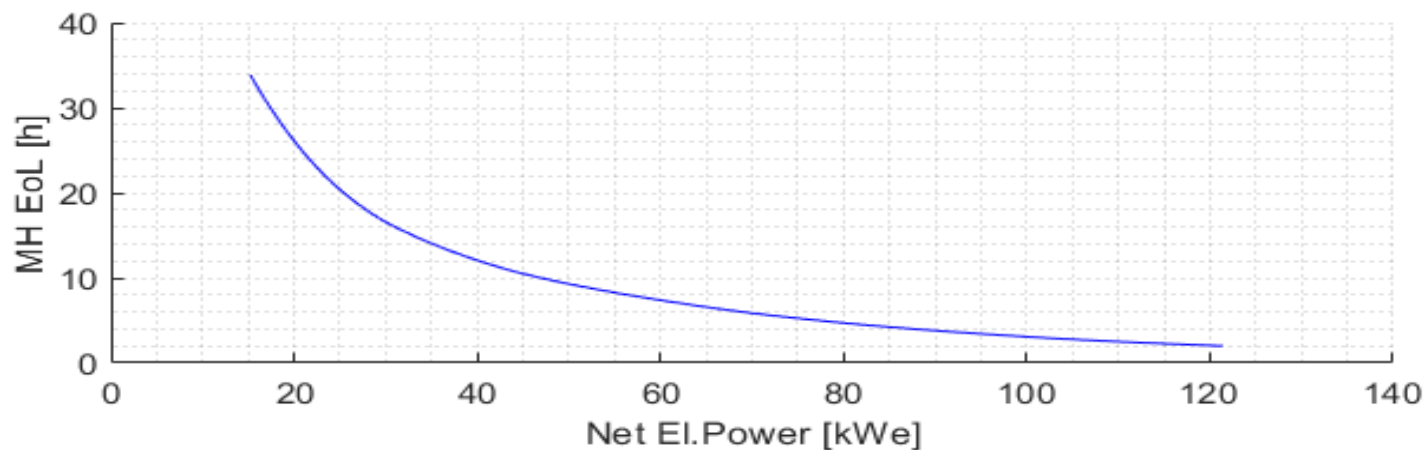
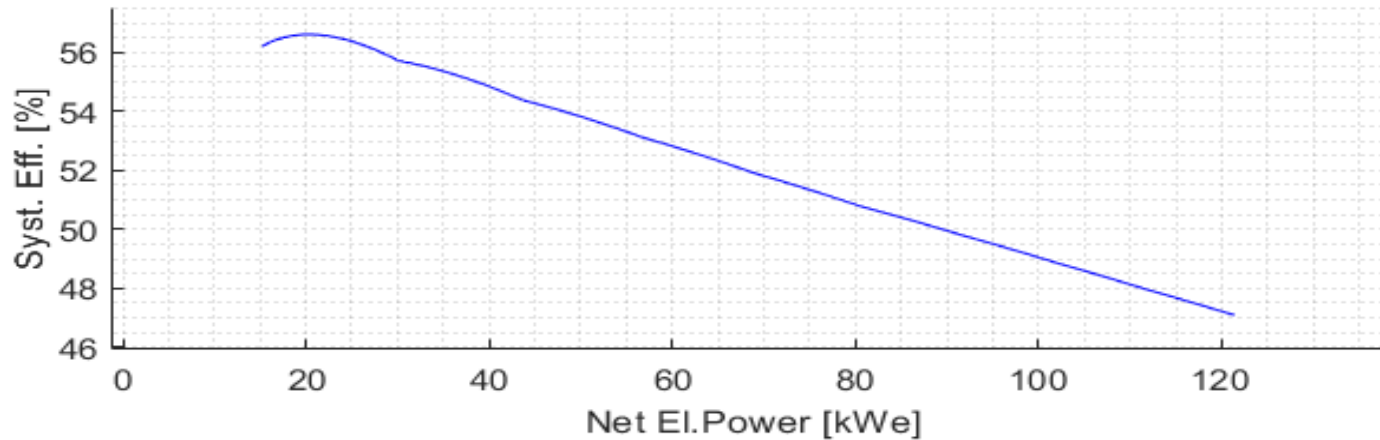


OR2: modello sistema Fuel Cell



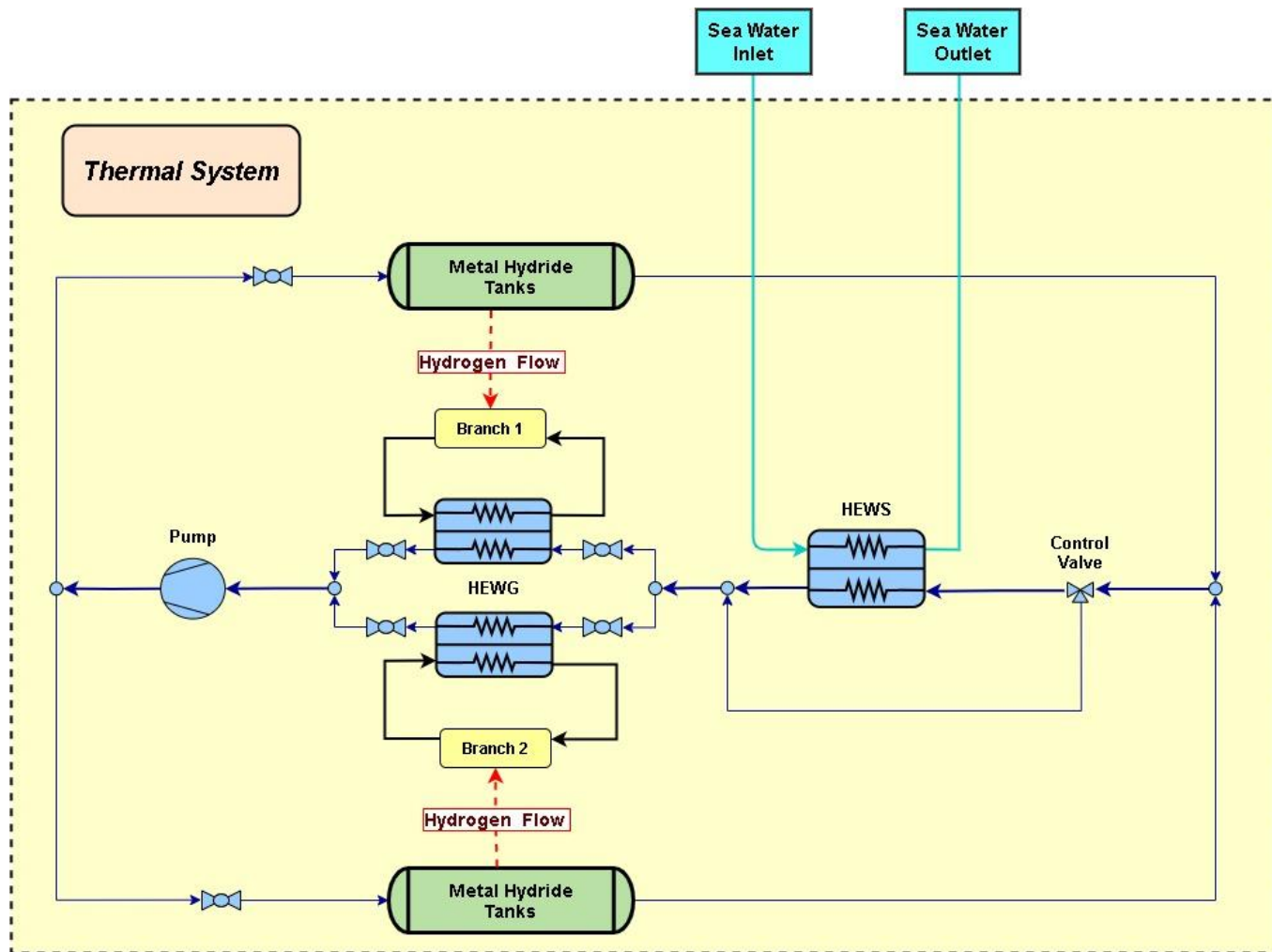
- Sviluppo di un modello Fuel Cell.
- Scelta del punto di design
- Scelta del numero di moduli da installare per raggiungere la potenza totale

OR2: Performance (cond. Statiche) del sistema FC–MH



- L'efficienza elettrica delle FC è maggiore in condizioni lontane dalla potenza massima.
- Le condizioni di lavoro a 6 nodi (45 kW netti) e 7 nodi (62 kW netti), presentano buone efficienze (>50%).
- Aumentare la richiesta di potenza, e quindi di idrogeno, influisce negativamente sulla durata delle bombole a idruri metallici MH.

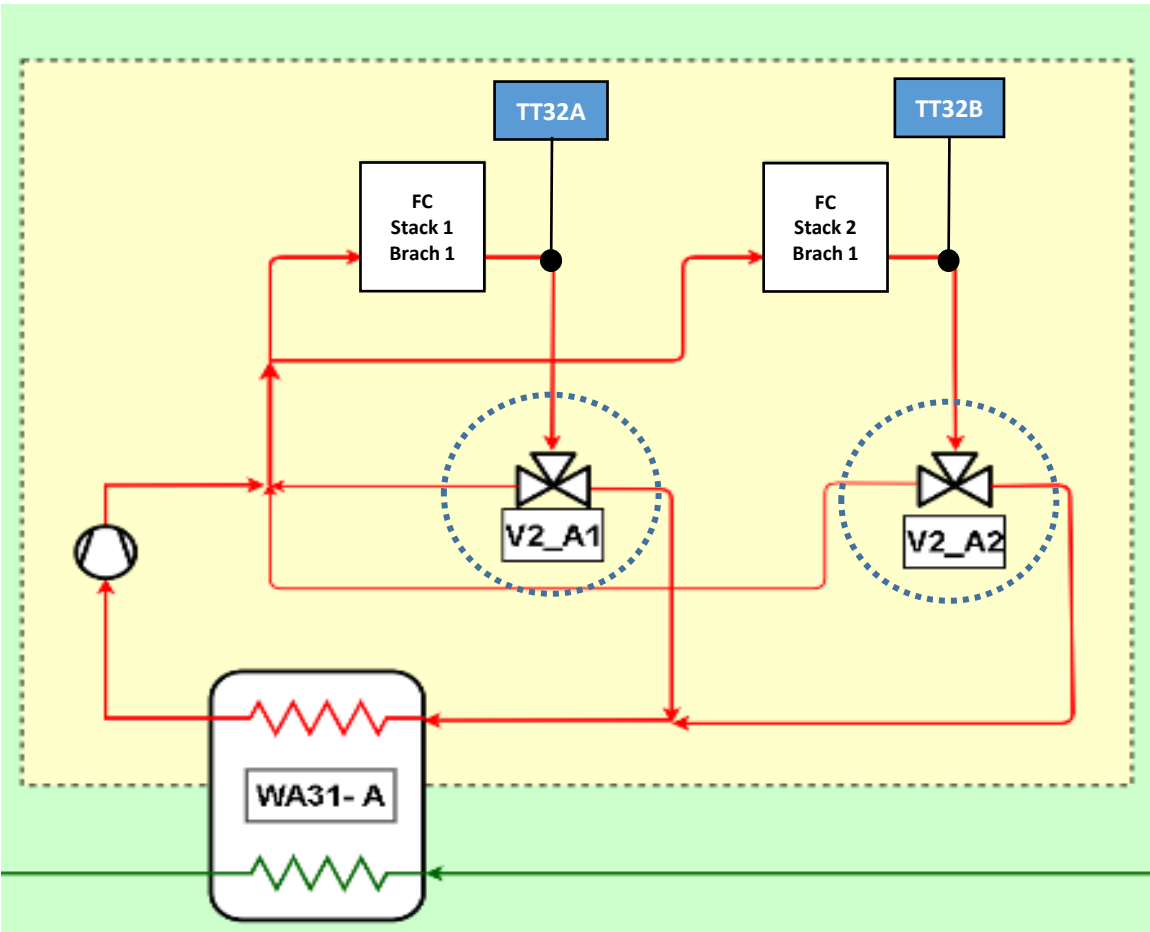
Modello sistema FC – idruri: gestione termica



- 2 moduli PEMFC da 71 kW l'uno
- 2 rack di idruri (24 bombole l'uno)
- Ogni sistema FC è dotato di un circuito di cooling che si interfaccia tramite uno scambiatore di calore con gli idruri.
- Per il controllo della temperatura del circuito, è inoltre presente uno scambiatore esterno acqua mare (HEWS).

OR4: Sistema di controllo

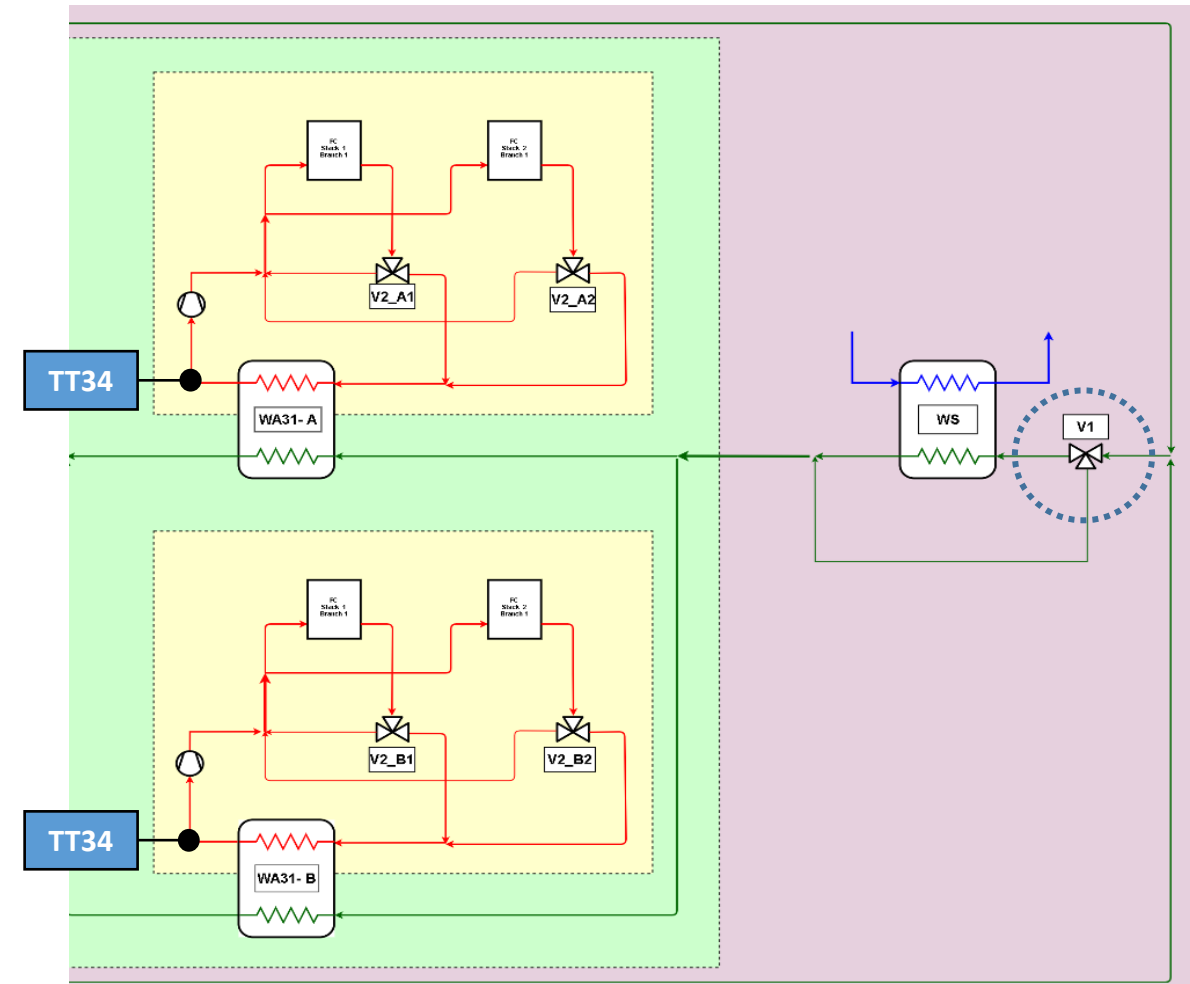
Controllo temperatura operativa degli stack PEMFC



- Sistema di controllo: temperatura operativa PEMFC.
- Viene misurata la temperatura del cooling in uscita dallo stack con il sensore di temperatura (**TT32A o TT32B**).
- Si misura la differenza tra valore atteso e valore misurato.
- Il controllore richiede una modifica dell'apertura della valvola (**V2_A1 o V2_A2**).
- L'attuatore esegue il comando.
- Lo scambiatore viene by-passato tanto più la temperatura misurata è inferiore a quella di set-point.
- Il transitorio si conclude al raggiungimento del valore atteso.
- Questa logica si applica ad ogni stack di ogni ramo del sistema celle a combustibile.

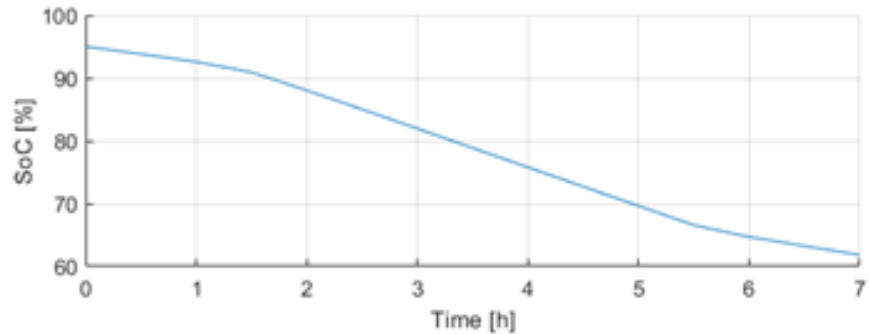
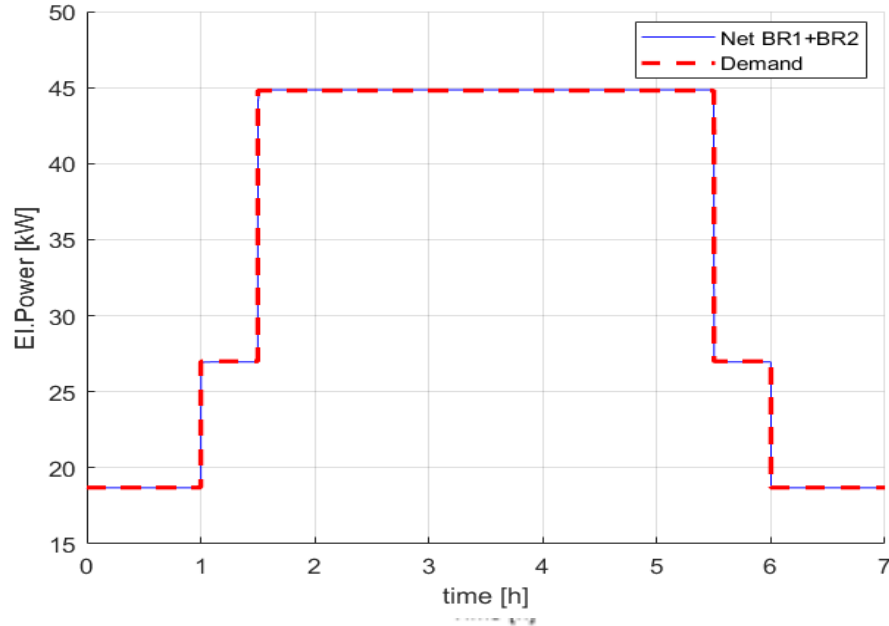
OR4: Sistema di controllo

Controllo temperatura acqua-glicole in uscita WA31



- Sistema di controllo: temperatura operativa PEMFC.
- Viene misurata la temperatura del cooling in uscita dallo scambiatore acqua-glicole (**WA31**) con il sensore di temperatura (**TT34**).
- Si misura la differenza tra valore atteso e valore misurato.
- Il controllore richiede una modifica dell'apertura della valvola (**V1**).
- L'attuatore esegue il comando.
- Lo scambiatore acqua-mare (**WS**) viene by-passato tanto più la temperatura misurata è inferiore a quella di set-point.
- L'obiettivo è quello di non costringere ad un funzionamento critico le valvole V2_A1 e V2_A2 / V2_B1 e V2_B2.

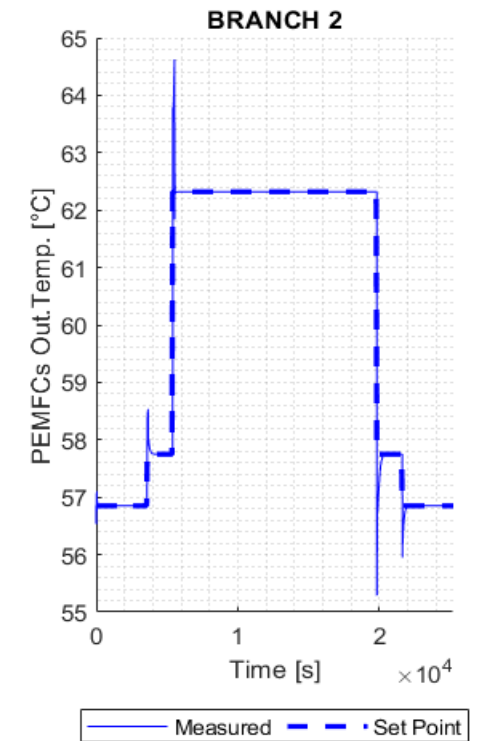
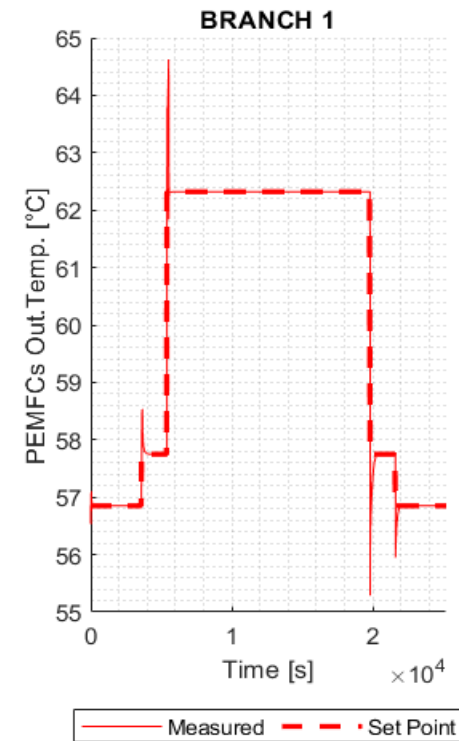
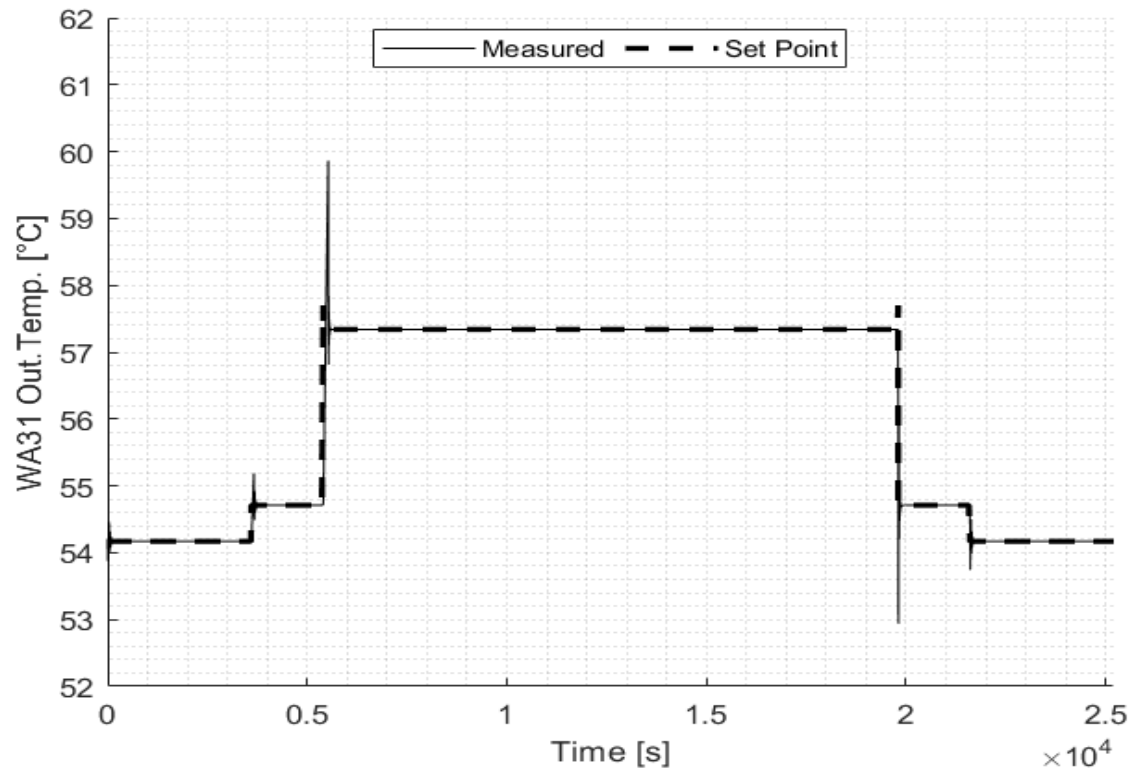
Verifica dell'autonomia



- Dato un possibile profilo di carico e **un'autonomia richiesta di 7 ore**, viene verificata l'autonomia.
- In questo caso viene testata una velocità di crociera pari a **7 nodi**.
- Si osserva che **l'autonomia è abbondantemente verificata**, in quanto lo stato di carica (SoC) degli idruri rimane al di sopra del 50%.

OR4: Controllo della temperatura

- Si nota come, con questo profilo di carico, le rampe massime di temperatura sono limitate entro 2 °C ed hanno una durata molto ridotta.
- Il sistema risponde bene da un punto di vista termico.
- Un aumento di potenza corrisponde ad un aumento delle temperature delle PEMFC, quindi nello scambiatore WA31 e negli idruri metallici, ma tale variazione è molto contenuta.



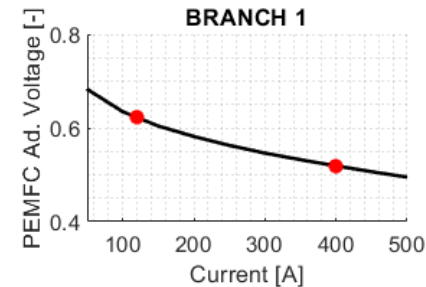
Analisi dinamica

Si è analizzata la risposta dinamica del sistema in caso di variazioni di carico a bordo nave.

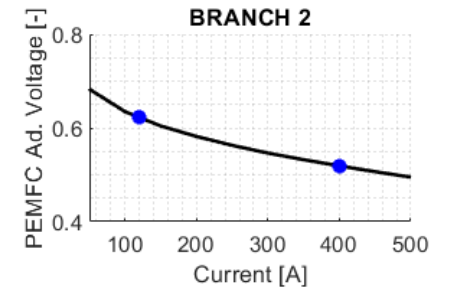
La FC ha una rampa massima, il sistema integrato FC-idruri è in grado di rispondere abbastanza prontamente alle variazioni richieste in navigazione?

Current	Power
400 A	Nominal Power (~60 kW)
120 A	Minimum Power (~17 kW)
Case studies	
CASE A	Nominal Power → Minimum Power
CASE B	Minimum Power → Nominal Power

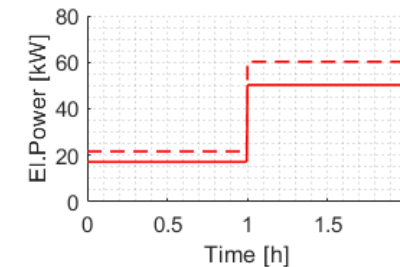
50 A/s



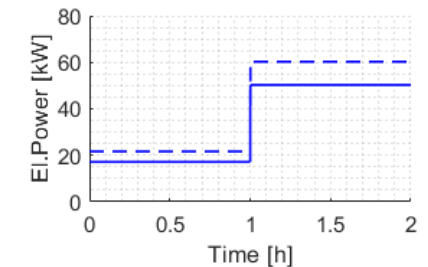
— Supplier PC ● WP-15min step



— Supplier PC ● WP-15min step



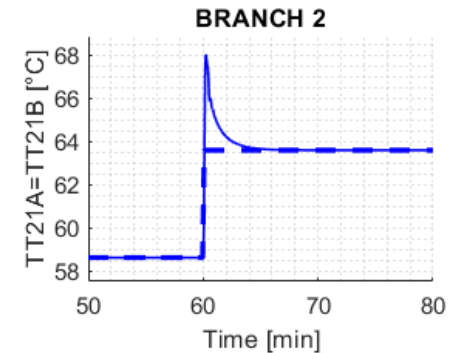
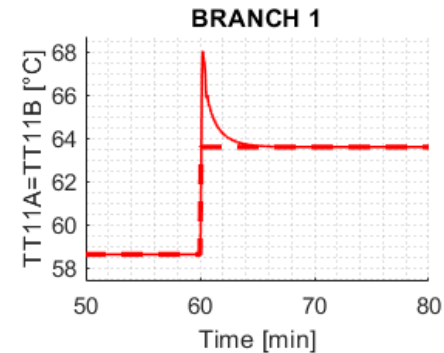
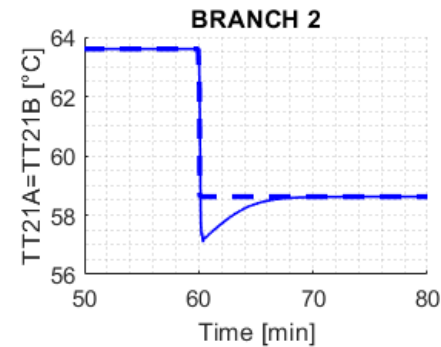
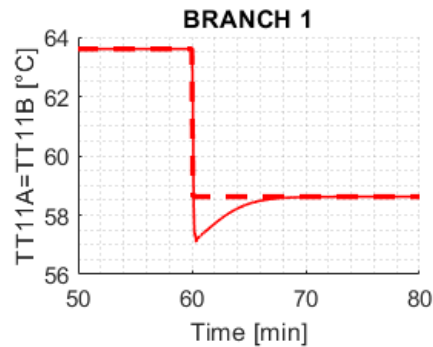
— NET - - - GROSS



— NET - - - GROSS

Risposta dinamica sistema FC

- Diminuire il carico sulle FC implica una diminuzione di corrente e una riduzione di temperatura in uscita dalle FC (TT11A, TT11B)
- Pertanto, viene modificata l'apertura della valvola nel circuito di cooling della FC
- Non si sono rilevate criticità nel transitorio in caso di riduzione di carico, mentre nel caso di aumento repentino il sistema ha bisogno di tempi maggiori.
- È possibile migliorare la gestione?

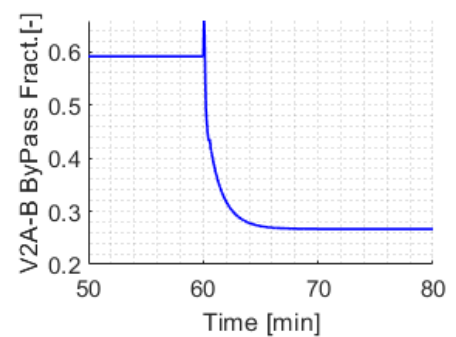
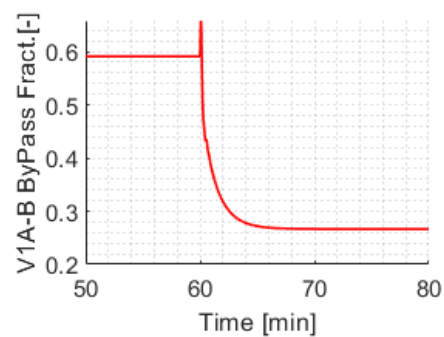
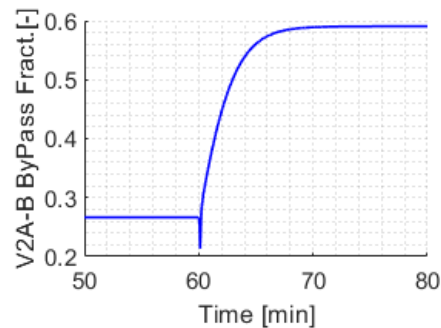
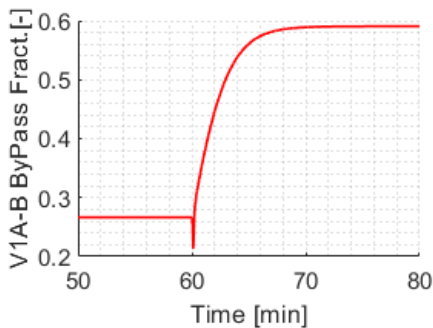


— Measured - - Set Point

— Measured - - Set Point

— Measured - - Set Point

— Measured - - Set Point



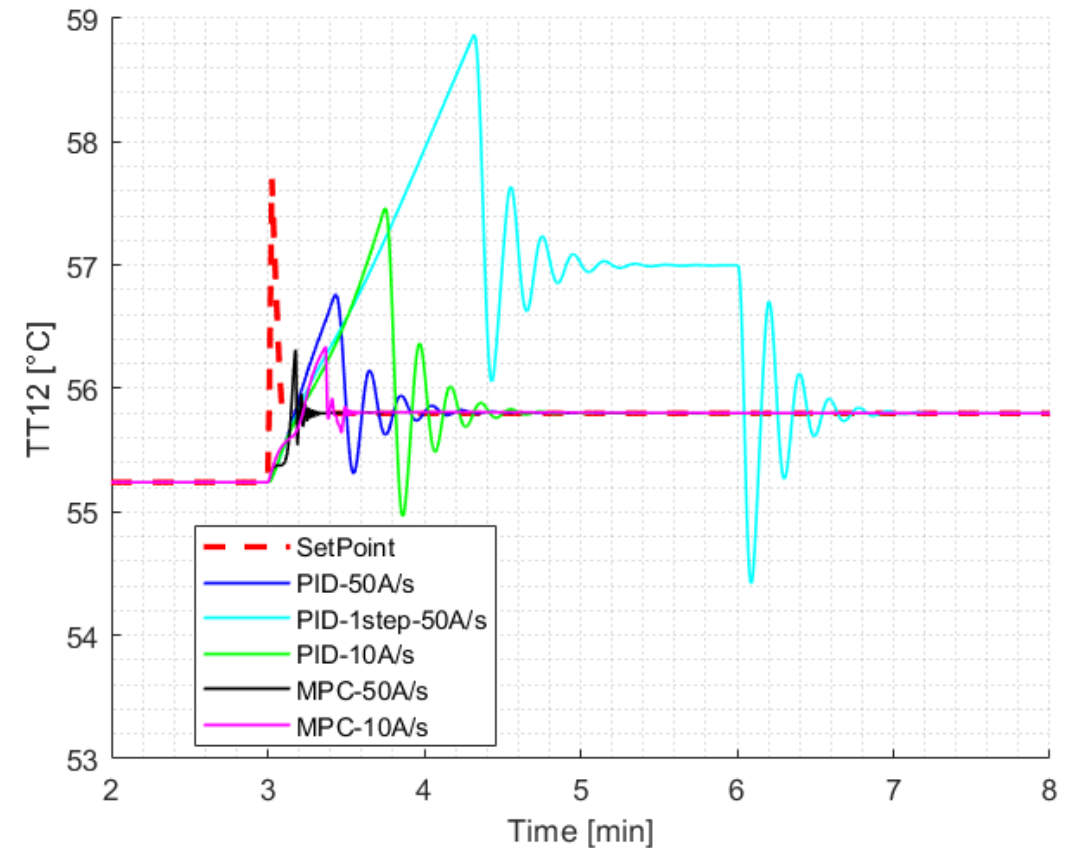
Metodi di controllo

In alcuni casi, la logica di controllo inizialmente implementata, ha mostrato alcuni limiti durante i transitori. È stato pertanto sviluppato un modello di controllo per confrontare tre possibili soluzioni:

1. Diminuire la velocità di avanzamento a 10 A/s
2. Introdurre uno step intermedio
3. Impiegare un metodo di controllo avanzato (Model Predictive Control – MPC).



La strategia MPC si è dimostrata la più affidabile, anche in caso di step di potenza richiesti significativi.



Test sistemi ZEUS in laboratorio TPG-UNIGE (2022)

All'interno del laboratorio UNIGE H2 sono stati testati:

- Sistema con PEMFC, potenza 71 kW
- Batterie, 42 moduli (50% del totale)
- 3 DC/DC converters (1FC, 2BAT)
- Circuito di raffreddamento
- Connessione a un carico elettrico
- Connessione a stoccaggio e linea H2

Test principali

- ✓ Avvio dei singoli componenti
- ✓ Comunicazione con sistemi di controllo
- ✓ Test FC – carico costante e test dinamici
- ✓ Test BAT – carica, scarica
- ✓ Test in parallelo – FC e BAT



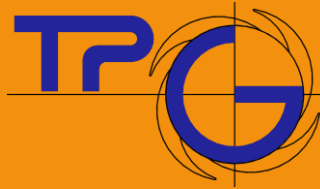
Conclusioni

- ✓ Attività preliminare di scouting tecnologie FC e MH
- ✓ Integrazione dei due sistemi e scelta dei moduli FC
- ✓ Sviluppo e validazione di un modello e di un sistema di gestione termica e accoppiamento dei sistemi FC-MH, in condizioni statiche e dinamiche
- ✓ Supporto a sviluppo protocolli prova e test in laboratori UNIGE di FC (71kW) + batterie (80 kWh) in parallelo prima di installazione a bordo.
- ✓ **Tutte le attività hanno dimostrato il corretto dimensionamento e accoppiamento dei due sistemi.**

Publicazioni

1. Cavo M, Gadducci E, Rattazzi D, Rivarolo M, Magistri L, *Dynamic analysis of PEM fuel cells and metal hydrides on a zero-emission ship: A model-based approach*, Int. J. Hydrogen Energy, 46 (2021), 32630-32644. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.07.104>
2. Cavo M, Rivarolo M, Gini L, Magistri L, *An advanced control method for fuel cells - metal hydrides thermal management on the first Italian hydrogen propulsion ship*, Int. J. Hydrogen Energy, 48 (2023), 20923-20934. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.07.223>
3. Cavo M, Gadducci E, Rivarolo M, Magistri L, Dellacasa A, Romanello M, Borgogna G, Davico C, *Thermal integration of PEM Fuel Cells and metal hydrides storage system for Zero Emission Ultimate Ship (ZEUS)*, Proceedings EFC21 European Fuel Cells and Hydrogen Conference, 334 (2022).
4. Gadducci E, Lamberti T, Magistri L, Rivarolo M, Dellacasa A, Campora B, Borgogna G et al., *Characterization and experimental comparison of commercial PEMFC stacks for marine applications*, Proceedings EFC21 European Fuel Cells and Hydrogen Conference, 334 (2022).

UniGe



Il progetto di ricerca TecBia e l'imbarcazione ZEUS

Ing. Massimo Rivarolo, PhD

massimo.rivarolo@unige.it