



Implementazione e simulazione di una Hybrid-Fuel Cell-Ship per applicazioni civili

Abstract

Nel seguente articolo verrà presentato lo sviluppo di un modello di propulsione ad idrogeno applicato ad una barca per trasporto passeggeri. Lo scopo è quello di verificare le prestazioni dell'imbarcazione in vista dei futuri sviluppi che dovrà subire il settore dei trasporti per far fronte alle sfide poste dall'inquinamento e dal cambiamento climatico. Il modello sarà composto da due fonti energetiche di alimentazione, una fuel cell di tipo PEM (Proton Exchange Membrane) ed una batteria di tipo Li-ion (ioni di litio). Questi due sistemi saranno poi collegati ad un sistema elettronico di potenza per ottenere la tensione in input del motore elettrico sincrono a magneti permanenti (PMSM). Il precedente sistema sarà associato ad un modello della barca e dell'ambiente di esercizio per verificare le prestazioni complessive della stessa, utilizzando un sistema di controllo per la gestione delle potenze in gioco. Il modello è stato sviluppato mediante il software Matlab/Simulink/Simscape della Mathworks.

1 Introduzione

Al giorno d'oggi la situazione che riguarda i danni dovuti all'uso dei combustibili fossili è uno dei principali argomenti che viene trattato dalla maggior parte dei paesi del mondo. Ad essi sono associati livelli crescenti di inquinamento dell'aria che influiscono sulla salute e sull'ambiente, il riscaldamento globale e i cambiamenti climatici sono uno dei principali indicatori di questa situazione. Inoltre, le più recenti situazioni di conflitti bellici hanno portato ad un importante aumento dei prezzi dei carburanti che nel complesso conducono sempre di più a spingere sullo studio e l'implementazione di sistemi energetici innovativi a basso costo ed a basso impatto ambientale. Una parte di questa spinta è data in maniera importante anche dai vari trattati sul clima che in particolare vedono come prossimo obiettivo il 2050, anno di scadenza dell'accordo di Parigi del 2015 [1]. Il trasporto in generale si configura come uno dei grandi responsabili delle emissioni inquinanti ed in particolare il settore marittimo occupa una parte rilevante che viene stimata in forte crescita nei prossimi anni [2]. Inoltre, ad

aggravare la situazione partecipa il tipo di combustibile maggiormente impiegato nell'ambito marittimo (gasolio) che comporta alti livelli di zolfo (nonostante le restrizioni imposte dai protocolli sopra citati), che aumentano i livelli di PM 2.5 e PM 10 e portano al fenomeno delle piogge acide e ripercussioni sulle zone costiere e non solo [3] [4].

Tra le soluzioni più promettenti a questi problemi si trovano le celle a combustibile (Fuel Cell) che possono essere di diverse tipologie, principalmente in base alle temperature operative e per il combustibile utilizzato [5][6]. Per la propulsione navale si mettono in luce quelle di tipo PEM viste le loro basse temperature operative (50°C-100°C) [7] (che sono più adatte viste le maggiori difficoltà di raffreddamento in quelle circostanze) associate all'idrogeno come fonte di energia per avere un sistema che produce energia elettrica e come prodotto di scarto solo acqua e calore. A questa fonte energetica è associata una batteria che permetta di gestire i picchi e le fasi di variazione di carico dove la fuel cell avrebbe più difficoltà a garantire da subito le necessarie prestazioni visti i ritardi dovute alle reazioni chimiche [8].

Questo sistema energetico si interfaccia mediante collegamenti elettronici di potenza con il motore di tipo AC della barca, scelto appositamente per il largo impiego nel settore della propulsione dovuto al maggior rendimento della macchina, alta flessibilità ed affidabilità e soprattutto alla semplicità degli algoritmi di controllo se rapportati a quelli utilizzati nei motori asincroni [9]. Il motore è stato collegato, poi, all'elica che dovrà fornire la spinta alla barca. Per quest'ultima sono state ipotizzate delle dimensioni di 20 metri di lunghezza e 20 tonnellate di peso, adibito al trasporto di persone in acque calme (il modello di riferimento dell'imbarcazione è quello di alcuni traghetti esistenti che navigano per vari canali nel mondo [10] o proprio imbarcazioni con propulsione a fuel cell ad idrogeno [11]). L'obiettivo del seguente articolo è illustrare il comportamento di tutti i componenti precedentemente citati, implementati in un unico modello per simulare il funzionamento di un'imbarcazione considerando alcune fasi operative reali.

2 Stato dell'arte

In questo capitolo verranno brevemente descritti i principali componenti utilizzati nella propulsione elettrica navale per applicazioni civili, sulla base di quanto riportato nella letteratura scientifica.

2.1 Fuel Cell

Una cella a combustibile (Fuel cell) è un dispositivo elettrochimico che consente di convertire l'energia chimica del combustibile (idrogeno in questo caso) direttamente in energia elettrica (producendo acqua come sottoprodotto), tramite reazioni chimiche [12]. Sono tre i principali componenti di una Fuel Cell: due elettrodi (un anodo e un catodo) ed una membrana elettrolita (posta tra i due elettrodi) che permette di far passare attraverso essa esclusivamente gli ioni H^+ .

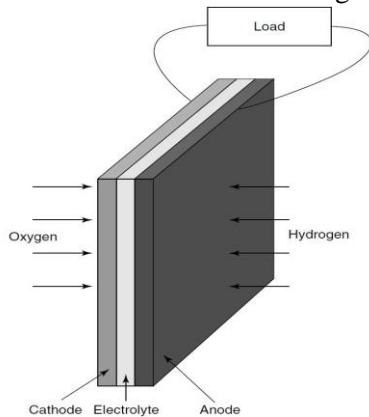
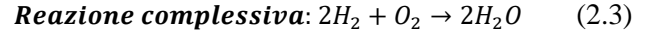
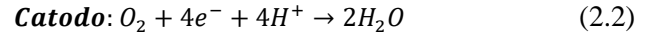
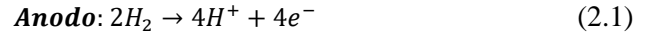


Fig. 1 Struttura di base di una Fuel Cell

Le reazioni che avvengono all'anodo e al catodo sono riportate di seguito [13]:



La tensione che teoricamente potrebbe essere raggiunta, dalla reazione tra idrogeno e ossigeno, è molto bassa (circa 1,229) [14].

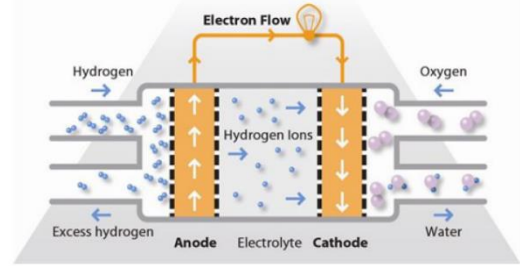


Fig. 2 Principio di funzionamento Fuel cell

Per produrre una tensione utile maggiore, risulta necessario collegare in serie diverse celle. Un insieme di celle in serie prende il nome di **stack**. La tensione dello stack è strettamente legata a quattro tipi di irreversibilità:

- Perdite per attivazione : $V_{act} = A \ln\left(\frac{i}{i_0}\right)$ (2.4)
con $A = \frac{RT}{2\alpha F}$
- Perdite resistive : $V_{ohm} = I * R_{FC}$; (2.5)
- Cross-over (trascurate nel modello Simulink) [15];
- Perdite per trasporto di massa (trascurate nel modello Simulink) [15].

Pertanto, la tensione della Fuel Cell può essere calcolata come segue [15]:

$$V_{FC} = V_{Nernst} - V_{ohm} - V_{act} \quad (2.6)$$

$$V_{Nernst} = V_0 + \frac{\Delta S}{2F}(T - 298) + \frac{RT}{2F} \ln(p_{H_2} \sqrt{p_{O_2}}) \quad (2.7)$$

Dove: $V_0 = -\frac{\Delta G}{nF} = \frac{-237.1 \cdot 10^3}{2 \cdot 96.485} = 1.23 [V]$ (Tensione a circuito aperto)

Per la nostra applicazione è stata scelta una cella a combustibile PEM. La PEMFC viene considerata la miglior tipologia di cella a combustibile per applicazioni marittime. Questa tipologia presenta i seguenti vantaggi:

- Bassa temperatura di esercizio;
- Elevata efficienza;

- Elevata potenza specifica;
- Bassa corrosione.

Test applicativi hanno dimostrato l'idoneità nell'ambiente marino in condizioni di urti, vibrazioni e aria salata [12]. Di seguito vengono riportati, rispettivamente, il datasheet, la curva di polarizzazione (I-V) e la curva I-P della Fuel Cell utilizzata.

Parameter	Unit	Value
Nominal power	kW	50.0
Nominal voltage	V	625
Nominal current	A	80
Nominal efficiency	%	55
Maximum power	kW	120.4
Voltage at maximum power	V	430
Maximum current	A	280
No-load voltage	V	900
Current reference ramp	A s ⁻¹	25
Operating temperature	°C	65
Fuel supply pressure	atm	1.5
Air supply pressure	atm	1.0
Fuel utilisation rate	%	99.25
Air utilisation rate	%	70.4

Fig. 3 Parametri Fuel cell

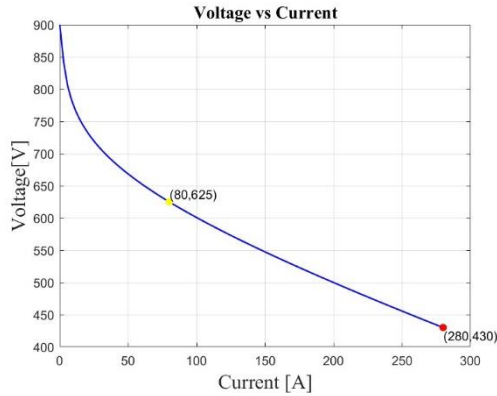


Fig. 4 Curva I-V

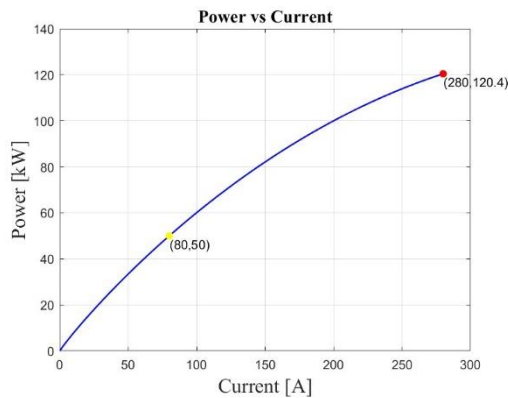


Fig. 5 Curva I-P

2.1.1 Consumo di aria e combustibile

In Simulink sono presenti due modelli per la Fuel Cell Stack: Semplificato e Dettagliato [15].

Il primo simula le condizioni operative della FC, mentre il secondo permette di poter variare gli input come temperatura di esercizio, pressione e flow rate di aria e combustibile. Per i nostri scopi, dunque, è stato scelto il modello dettagliato. Di seguito le equazioni per le portate volumetriche [lpm]:

$$\dot{V}_{fuel} = \frac{60000 * R * T * N_c}{2 * F * P_{fuel} * \mu_{fH_2} * \gamma_{H_2}} * I_{FC} \quad (2.8)$$

$$\dot{V}_{air} = \frac{60000 * R * T * N_c}{4 * F * P_{air} * \mu_{fO_2} * \gamma_{O_2}} * I_{FC} \quad (2.9)$$

Portate massiche [kg/s]:

$$\dot{m}_{H_2} = \dot{V}_{fuel} * \rho_{H_2} \quad (2.10)$$

$$\dot{m}_{air} = \dot{V}_{air} * \rho_{air} \quad (2.11)$$

Massa totale [kg]:

$$m_{H_2} = \int_0^t \dot{m}_{H_2} dt \quad (2.12)$$

$$m_{air} = \int_0^t \dot{m}_{air} dt \quad (2.13)$$

2.1.2 Efficienza

Le Fuel Cell, ovviamente, non sono soggette al limite imposto dal rendimento di Carnot. Ipoteticamente, in assenza di irreversibilità, il limite imposto sarebbe pari ad uno se venisse confrontata l'energia elettrica prodotta con la variazione di energia libera di Gibbs. Per le Fuel Cell risulta più adatto confrontare l'energia elettrica prodotta con l'energia chimica contenuta nel combustibile [16]. Seguendo quest'ultima indicazione l'efficienza viene così definita:

$$\eta_{max} = \frac{\Delta G}{\Delta H} = 1 - \frac{T * \Delta S}{\Delta H} \quad (2.14)$$

$$\eta_{max} = \frac{-237.1}{-285.8} = 83.0\% \quad (2.15)$$

Dove:

- ΔG è pari alla variazione di energia libera di Gibbs;
- ΔH risulta essere il potere calorifico superiore (HHV)

La massima efficienza corrisponde alla condizione di no-load. L'efficienza dello stack viene ora definita

come il rapporto tra la tensione della cella e la tensione a circuito aperto (OCV):

$$\eta_{stack} = \mu_{f,H2} * \frac{V_{FC}}{V_0} \quad (2.16)$$

2.1.3 Efficienza del sistema completo

Volendo considerare l'interezza del sistema Fuel cell, bisogna considerare che sono necessari altri componenti come: compressori, controllori, sistema di gestione dell'acqua etc. [16]

Considerando il sistema completo ci si può aspettare un'efficienza che è compresa in un range tra il 50-60%.

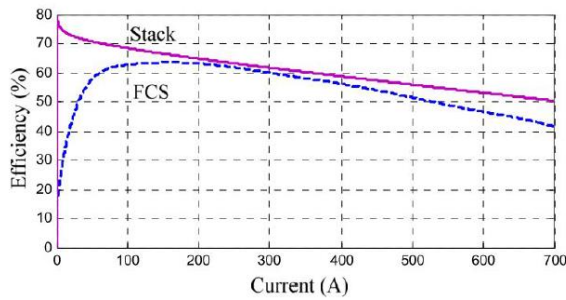


Fig. 6 Efficienza Fuel Cell stack system

Nel modello utilizzato in Simulink, è presente esclusivamente la Fuel Cell. Per tener conto del sistema completo si è scelto di far lavorare (in alcune simulazioni) la Fuel Cell tra 5 kW e 85 kW per ottenere un funzionamento che permetta di lavorare nel range di efficienza sopra citato.

2.2 Batteria

Qualora la fuel cell fornisca una potenza P_{FC} superiore alla richiesta del motore, il surplus è indirizzato verso un sistema di batterie agli ioni di litio Li-ion, con una tensione nominale 403.2 V e una capacità nominale di 86 Ah. Viceversa la batteria entra nella fase di scarica. Le batterie agli ioni di litio offrono molti vantaggi, tra cui un'elevata densità di energia, fino a 265 Wh/kg, ed una bassa autoscarica, circa 1-2% al mese [17].

Senza un sistema di regolazione, tuttavia, la batteria lavora in situazioni operative non idonee a garantire una vita utile prolungata, poiché il suo stato di carica non è controllato. A tal proposito è presente nel modello simulink un "regolatore di carica", il quale garantisce che la batteria operi nel range di tensione:

$$V_{min} < V_{batt} < V_{max}.$$

La logica di ricarica della batteria è contenuta all'interno del 'Controllo della Batteria' e verrà spiegata nel dettaglio nel paragrafo tre: si basa comunque su

un parametro di fondamentale importanza quale lo *state of charge* (o SoC), che indica la quantità di energia immagazzinata nella batteria in rapporto alla sua capacità totale. Il SoC è un dato critico per assicurare prestazioni ottimali della batteria; infatti, un'eventuale sovraccarica può determinare una serie di problemi, quali riduzioni di capacità ed efficienza fino ad anche rischi per la salute, incendi o esplosioni. Inoltre, un opportuno monitoraggio del SoC è necessario per ottimizzare ed estendere la vita utile della batteria, poiché continui cicli di carica e scarica possono determinare un degrado della capacità. Per semplicità nella simulazione non sono stati presi in considerazione gli effetti dell'invecchiamento e della temperatura.

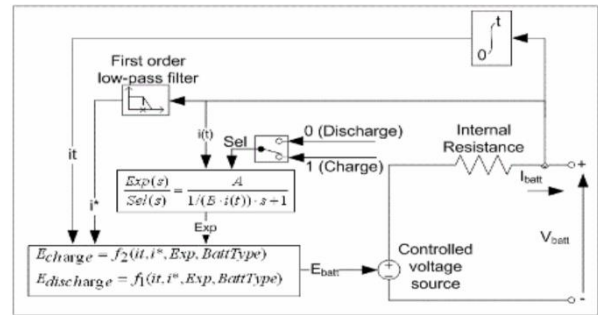


Fig. 7 Modello della Batteria in Simulink

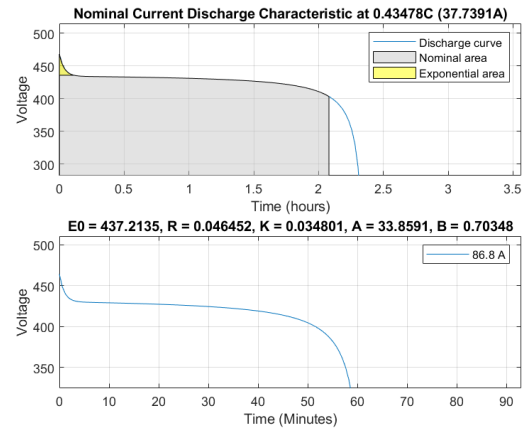


Fig. 8 Curva di scarica della batteria

2.3 Convertitore DC-DC

Il convertitore DC-DC è utilizzato al fine di ridurre la tensione continua in uscita dalla fuel cell fino a un valore desiderato, che coincide con il range di tensione nominale in ingresso alla batteria nell'intorno di 403.2 V. Il convertitore scelto è quindi un *buck converter*, e in particolare della tipologia *average model*: con questo metodo si prende in considerazione un modello semplificato del convertitore, ricavabile esaminando soltanto le caratteristiche peculiari del suo

funzionamento, ovvero i valori di tensione e corrente ai morsetti di ingresso e di uscita. Il valor medio della tensione in uscita è pari a [18]:

$$\overline{V_u} = E_a * \frac{\tau}{T} \quad (2.17)$$

Dipende quindi dal rapporto di modulazione (o *duty cycle*), cioè dal rapporto tra la durata dell'intervallo di conduzione e il periodo di commutazione del transistor, oltre che dalla tensione continua di alimentazione E_a . È inoltre opportuna la presenza di filtri LC lato sorgente e lato carico per ridurre le ondulazioni di corrente e tensione, i cui valori sono stati dimensionati sulla base delle seguenti relazioni [18]:

$$L = \frac{E_a * T}{4 * \Delta i_{\max pk-pk}} \quad (2.18)$$

$$C = \frac{\Delta i_{\max pk-pk} * T * (1 - \frac{\overline{V_u}}{E_a})}{\Delta V_{\max pk-pk}} \quad (2.19)$$

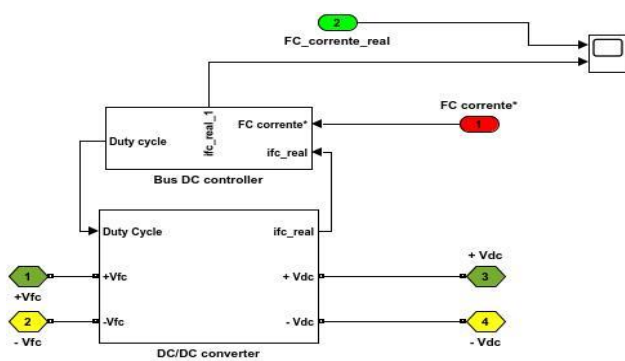


Fig. 9 Convertitore DC-DC

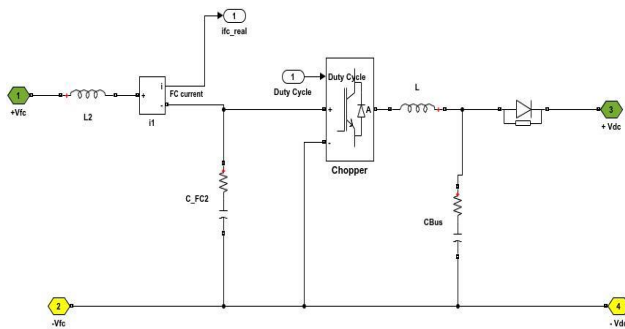


Fig. 10 Modello del buck converter

Il controllo del convertitore è in corrente, e avviene tramite variazione del duty cycle grazie alla tecnica di modulazione a larghezza di impulso PWM, che è la più largamente utilizzata in quanto risulta essere di facile implementazione e col vantaggio di mantenere le frequenze delle armoniche presenti su tensione e

corrente di uscita e sulla corrente assorbita dal convertitore indipendenti dal rapporto τ/T [18]. In sintesi, un segnale modulante proporzionale all'uscita desiderata e un segnale portante a dente di sega sono confrontati in un comparatore, il cui segnale di uscita coincide con il segnale di comando che regola l'apertura o la chiusura del transistor. Il controllo è quindi definito in simulink nel sottosistema '*Bus DC Controller*': la differenza tra la corrente i_{FC} in uscita dal convertitore e la i_{REF} di riferimento ottenuta dal '*Power Management System*' è minimizzata da un regolatore PI, e successivamente il segnale modulante ottenuto in uscita dal regolatore è convertito nel duty cycle desiderato con la PWM e impiegato per pilotare l'interruttore statico del convertitore.

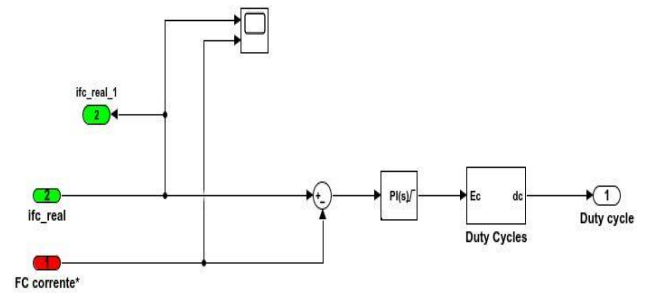


Fig. 11 Bus DC Controller

2.5 Motore elettrico: PMSM

Per convertire l'energia elettrica prodotta in energia meccanica utile è necessario utilizzare un motore elettrico. I motori elettrici si classificano in motori AC e DC [16]. Fanno parte della prima tipologia i motori sincroni a magneti permanenti PMSM, i quali, ad oggi, sono i più utilizzati nella propulsione elettrica navale. Il vantaggio principale dell'uso di questa tipologia di motore è rappresentato dall'assenza del sistema spazzole-collettore (a differenza di quanto avviene nei motori DC). Inoltre, ulteriori vantaggi riguardano le minori perdite nel rame dell'avvolgimento di eccitazione, con conseguente aumento del rendimento e riduzione delle dimensioni della macchina [19]. La macchina sincrona a magneti permanenti è composta da una parte fissa (statore) e da una parte rotante (rotore). Sullo statore si ha un avvolgimento trifase. Il circuito rotorico, invece, non presenta avvolgimenti, ma in esso sono inseriti dei magneti permanenti, il cui compito è generare il flusso di eccitazione che ruota alla stessa velocità del rotore. Inoltre, a seconda della disposizione dei magneti, la

macchina può essere isotropa o anisotropa. I magneti, infatti, possono essere incollati sulla superficie esterna (isotropa), oppure essere inseriti all'interno della struttura rotorica [19]. In questo articolo è stato considerato un motore sincrono a poli salienti (macchina anisotropa).

2.5.1 Modello dinamico

Trascurando le perdite nel ferro e supponendo perfettamente sinusoidale la distribuzione degli avvolgimenti di statore, le equazioni differenziali che descrivono il comportamento della macchina sincrona a magneti permanenti (che non presenta gabbia smorzatrice), riferite a una coppia di assi ortogonali solidali con il rotore, risultano:

$$v_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - \omega \Phi_{sq} \quad (2.20)$$

$$v_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} - \omega \Phi_{sd} \quad (2.21)$$

Dove:

$$\Phi_{sd} = L_{sd} i_{sd} + \Phi_m \quad (2.22)$$

$$\Phi_{sq} = L_{sq} i_{sq} \quad (2.23)$$

Con ω velocità angolare del rotore (espressa in radianti elettrici al secondo), Φ_m è il flusso prodotto dai magneti permanenti e concatenato con l'avvolgimento di statore, Φ_{sd} e Φ_{sq} sono le componenti dei flussi di statore, R_s è la resistenza statorica, i_{sd} e i_{sq} sono le correnti statoriche, L_{sd} e L_{sq} sono le induttanze dello statore, v_{sd} e v_{sq} sono le tensioni statoriche [20]. La coppia elettromagnetica risulta:

$$T_e = p * [(L_{sd} - L_{sq}) i_{sd} + \Phi_m] * i_{sq} \quad (2.24)$$

2.5.2 Sistema meccanico

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J} (T_e - T_f - F\omega_m - T_m) \quad (2.25)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_m \quad (2.26)$$

- J rappresenta l'inerzia del sistema [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$];
- F coefficiente di attrito [Nms];
- θ è la posizione angolare del rotore [rad];
- T_m rappresenta la coppia di attrito fornita dall'albero (trascurata nel nostro caso) [Nm];
- ω_m è la velocità angolare del rotore [rad/s] [21].

2.5.3 Parametri e curva caratteristica del motore

In questa sezione vengono riportate rispettivamente la curva caratteristica del motore utilizzato e la tabella dei principali parametri riportati nel simulink block del motore.

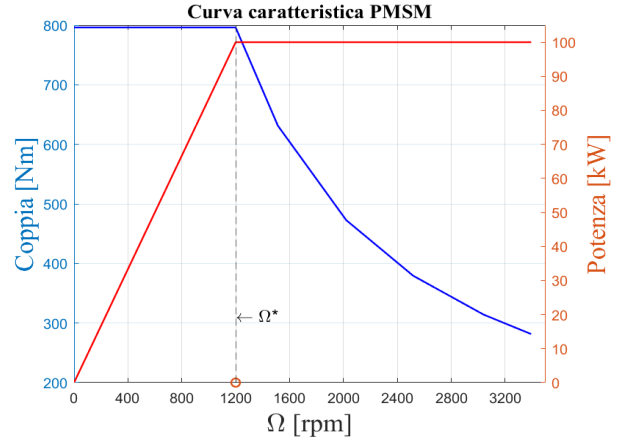


Fig. 12 Curva caratteristica PMSM

Parametri	Unit	Value
R_s	Ohm	0.00423
L_{sd}	H	0.000171
L_{sq}	H	0.000391
Coppie polari (p)	-	6
Φ_m	Wb	0.1039

Tabella 1 Parametri motore PMSM

2.6 Inverter

Se lato fuel cell il convertitore gestisce gli scambi energetici con la batteria, lato carico è necessaria la presenza di un convertitore DC-AC tra la batteria e il motore sincrono a magneti permanenti che regoli la tensione sul motore stesso. Per tale motivo si è scelto l'inverter trifase presente nella libreria 'AC6 SimPowerSystems Electric Drives' di simulink: in questo modo si limita il range di tensione che alimenta il PMSM evitando di danneggiarlo. Questa soluzione con due convertitori permette quindi di avere una tensione di sorgente e di batteria diversa da quella prevista per il carico. Nella configurazione impiegata l'inverter trifase è costituito da 6 interruttori statici, la cui frequenza di switch è regolata dal sistema di controllo vettoriale ad indebolimento di flusso. In uscita fornisce una terna di tensioni caratterizzate dalla stessa

forma d'onda e da uno sfasamento reciproco pari ad un terzo di periodo.

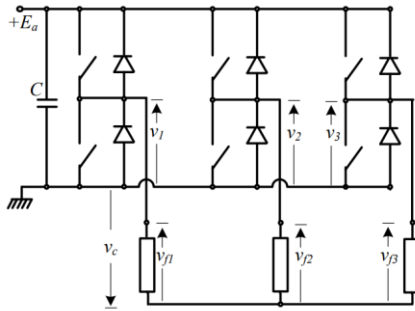


Fig. 13 Modello di un inverter trifase

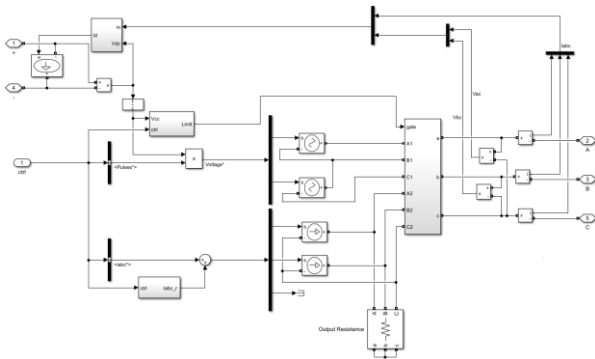


Fig. 14 Modello simulink dell'inverter trifase

2.6.1 Modalità di controllo

Un PMSM richiede un indebolimento di campo per aumentare la velocità dell'albero oltre il valore nominale di progetto. Un approccio per ottenere una maggiore velocità del motore consiste nel regolare l'elettronica di potenza dell'inverter per manipolare le correnti sugli assi d e q dello statore. Per aumentare la velocità del motore oltre la sua velocità di base, viene utilizzata la modalità di indebolimento di campo pur mantenendo una potenza di output costante (come prodotto della coppia e della velocità del motore). Durante l'indebolimento di campo, il motore può ruotare più velocemente alla massima tensione disponibile, con una conseguente riduzione della coppia massima [22].

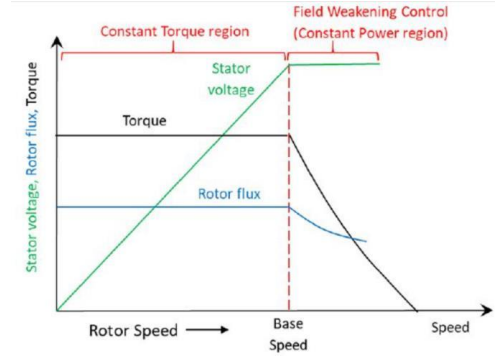


Fig. 15 Caratteristica statica coppia-velocità del PMSM

Il controllo dell'inverter (e quindi del motore PMSM), è effettuato in simulink dai due subsystem sotto evidenziati: 'speed controller' e 'VECT'. In ingresso allo speed controller entrano la velocità di rotazione istantanea del rotore e la coppia in uscita dal primo subsystem di controllo, e fornisce in uscita il riferimento di coppia. Il VECT è invece il blocco che effettua il controllo vettoriale ad indebolimento di flusso, e si basa sui valori di coppia e di flusso in arrivo dal primo controller, sul rotor angle θ e sulla corrente I_{abc} in ingresso al motore; l'azione di regolazione interviene proprio sul valore della I_{abc} e sul parametro Pulses, che è invece correlato alla frequenza di apertura e chiusura dei transistor presenti nell'inverter trifase [22].

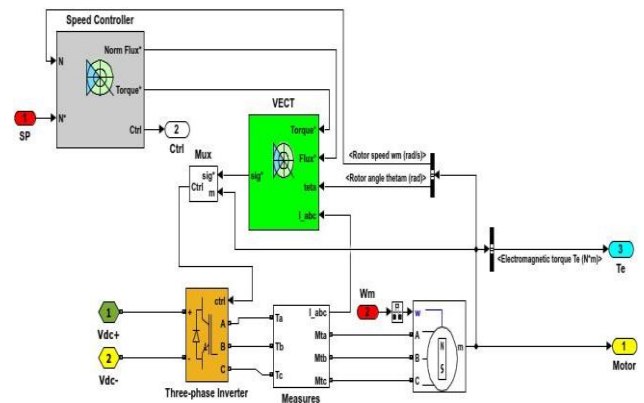


Fig. 16 Modello di controllo del PMSM

2.7 Elica

L'elica è l'organo meccanico che permette di trasformare la rotazione generata dal motore in spinta propulsiva per l'avanzamento della barca. In generale ne esistono una molteplice varietà con caratteristiche diverse a seconda dell'utilizzo; nel nostro caso abbiamo considerato un traghetto di dimensioni modeste che

naviga in acque calme il cui principale requisito è la manovrabilità [23]; per l'implementazione di questo componente in Simscape è stato usato l'apposito blocco “**Marine Propeller**” inserito in un sistema adibito al calcolo della resistenza di avanzamento dello scafo per ottenere come risultato finale la velocità della barca e la distanza percorsa. Per l'accoppiamento elica - motore elettrico è stato inserito un riduttore di velocità (con rapporto pari a 2), per semplicità senza attriti.

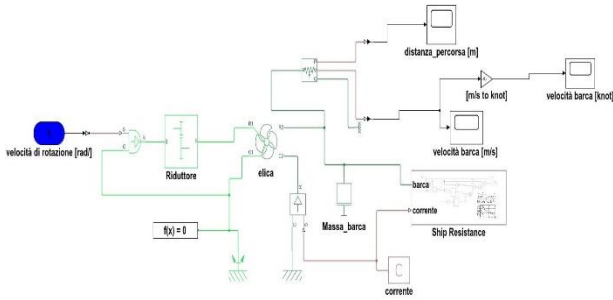


Fig. 17 Modello elica

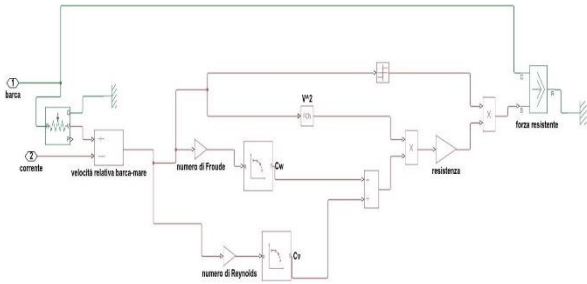


Fig. 18 Modello resistenza scafo

Per prima cosa è stato definito “l'ambiente di lavoro” dell'elica, cioè il sistema che calcola la resistenza dell'imbarcazione. Per fare questo sono innanzi tutto state determinate le dimensioni della barca, basate principalmente sul precedente lavoro effettuato da Choi et al. [11] su un traghetto alimentato con fuel cell (per avere un riferimento sui risultati), ma anche su un ulteriore studio su un'imbarcazione [24] il cui obiettivo principale era la determinazione del ‘wake fraction coefficient’ di cui si parlerà più avanti. Pertanto, si è optato per una lunghezza di 20 metri, una larghezza di 6 metri con peso pari a 20 tonnellate. Il sottosistema per calcolare la resistenza all'avanzamento si basa sulla formula che esplicita il coefficiente di resistenza dello scafo C_t [23],[25],[26]

$$C_t = \frac{R_t}{\frac{1}{2}\rho S V^2} \quad (2.27)$$

in cui R_t è la resistenza all'avanzamento della barca, ρ è la densità dell'acqua, V è la velocità della barca (calcolata come differenza tra la velocità effettiva e la velocità della corrente dell'acqua in cui si naviga) ed S è la superficie immersa della barca che è stata ottenuta in maniera semplificata con delle considerazioni sul galleggiamento di un corpo di forma cilindrica delle stesse dimensioni e peso della nostra imbarcazione (non avendo possibilità di determinarla in maniera esatta poiché non si ha una geometria reale dello scafo). La resistenza dello scafo R_t è composta da due contributi principali: la resistenza viscosa e la resistenza d'onda (R_v e R_w), da cui derivano due coefficienti distinti (C_v e C_w) che sommati ci danno il coefficiente totale C_t ; vediamo separatamente la loro determinazione:

$$C_v = C_F + K C_F \quad (2.28)$$

Il contributo di questo coefficiente deriva dalla somma di una parte tangenziale di resistenza viscosa (C_F), dovuta all'interazione tra lo scafo in avanzamento e il fluido che si muove intorno, che avrà una determinata viscosità, ed una parte normale ($K C_F$), dovuta principalmente alla pressione agente sulla superficie dello scafo e quindi è strettamente dipendente dalle sue dimensioni. Per la determinazione di queste due componenti si potranno usare le seguenti formule:

$$C_F = \frac{0.075}{[(\log_{10} Re) - 2]^2} \quad (2.29)$$

(in cui Re è il numero di Reynolds)

$$K \approx 19 \left(\frac{\nabla}{L \cdot B \cdot T} \cdot \frac{B}{L} \right)^2 \quad (2.30)$$

in cui L è la lunghezza della barca, B è la larghezza, T è la quantità di scafo immersa e ∇ è il volume di fluido spostato dalla barca.

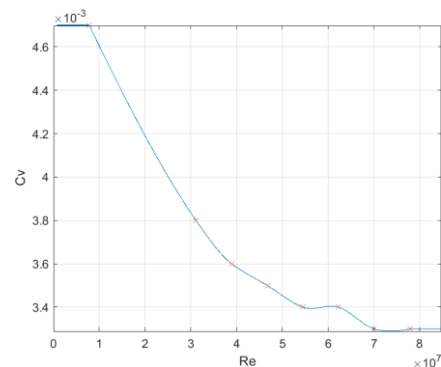


Fig. 19 Andamento C_v

- C_w

Rappresenta un coefficiente che indica la perdita energetica dovuta alla “produzione” di onde durante l’avanzamento, maggiore sarà infatti la velocità, maggiore sarà la dimensione di queste onde e di conseguenza l’energia sottratta alla barca. Per la determinazione di questo parametro non sono presenti formule, ma possiamo basarci sulle evidenze pratiche che hanno dimostrato come diverse imbarcazioni, sia per dimensioni che per velocità, creino dei sistemi d’onda uguali se si ha l’uguaglianza del numero adimensionale di Froude $Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot L}}$ (si tratta di sistemi in similitudine tra loro); per questo motivo si rimanda a [24] per la determinazione di una curva del C_w rispetto a Fr .

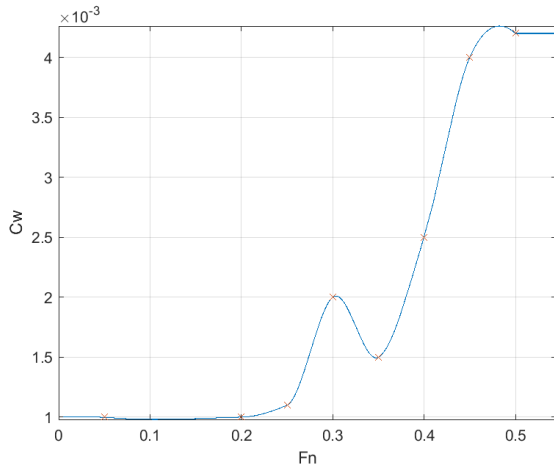


Fig. 20 Andamento C_w

Determinati quindi i valori di C_v e C_w , questi vengono inseriti in apposite tabelle nel sottosistema della resistenza all’avanzamento in cui, dopo aver calcolato la velocità relativa barca-corrente ed averla usata per determinare Re e Fr , restituiscono i valori di questi coefficienti per le condizioni attuali di moto che vengono poi sommati e usati per la determinazione della resistenza all’avanzamento. Questo sottosistema si interfaccia direttamente con la parte principale della propulsione in acqua, l’elica. Come prima cosa è stata fatta una stima basilare delle caratteristiche dimensionali di questo componente, essendo note le prestazioni del motore elettrico, partendo dal diametro che possiamo determinare come: [27]

$$D = \frac{632.7 \cdot Pot^{0.2}}{RPM^{0.6}} \quad (2.31)$$

Dove **Pot** è la potenza erogata dal motore e **RPM** è il numero di giri considerato (tenendo presente il rapporto di riduzione). Possiamo poi definire il passo come la distanza percorsa dall’elica durante una rotazione completa. Pertanto, risulta determinabile facendo il rapporto tra la velocità teorica della barca (quella che noi determineremo come velocità di crociera) e il numero di giri dell’elica in quelle condizioni (considerando il rapporto di riduzione in uso), incrementandolo del 20% circa che tiene in considerazione il regresso (l’elica che si muove nel fluido non trasmette completamente la spinta e “slitta” nel suo avanzamento) [28]. Per ultimo si è adottata una stima approssimata per capire se ci sia il rischio di avere cavitazione (avendo queste caratteristiche geometriche, usando degli indici di difficoltà che ci indicano il rischio di vibrazioni indotte proprio dalla cavitazione). In particolare, è stata utilizzata la formula di Kawasaki secondo cui:

$$(Pot \cdot N^2)^{0.4} < 3500 \quad (2.32)$$

Dove **Pot** è la potenza (in Hp) ed **N** è il numero di giri al minuto [29]. Dopo la fase preliminare della definizione dell’elica è stato impostato il suo funzionamento nel Simscape block ‘Marine Propeller’ attraverso la parametrizzazione tra vettore di avanzamento (**J**) e coefficienti di spinta (**K_t**) e coefficienti di coppia (**K_q**); questi valori sono ottenibili tramite le formule: [30]

$$J = \frac{U_p}{n_p \cdot D} \quad (2.33)$$

$$K_t = \frac{T_0}{\rho \cdot n_p^2 \cdot D^4} \quad (2.34)$$

$$K_q = \frac{Q_{p0}}{\rho \cdot n_p^2 \cdot D^5} \quad (2.35)$$

Dove n_p è la velocità di rotazione dell’elica (giri/s), **D** è il diametro dell’elica, **T₀** è la spinta propulsiva dell’elica, ρ è la densità dell’acqua, **Q_{p0}** è la coppia dell’elica tenendo in considerazione la presenza del riduttore e quindi la sua efficienza ($Q_{p0} = \eta \lambda Q_p$ con **Q_p** la coppia effettiva del motore, λ il rapporto di riduzione ed η il rendimento del riduttore); abbiamo poi **U_p** che è la velocità del fluido in prossimità dell’elica e può avere un valore diverso dalla velocità effettiva dell’imbarcazione, per questo motivo il suo valore è determinato da:

$$U_p = U(1 - w) \quad (2.36)$$

Dove è necessaria la determinazione del *wake fraction coefficient* [31], un parametro che misura il rapporto tra la differenza di velocità fluido-barca rispetto alla velocità della barca stessa. Questo coefficiente sarà minore dell'unità, ed in particolare si hanno a disposizione valori di riferimento per questa tipologia di imbarcazione, oltre che una formula semplificata di riferimento [25]:

$$w = 0.5 \cdot C_b - 0.05 \quad (2.37)$$

Dove C_b è il rapporto tra volume immerso dell'imbarcazione rispetto al volume di una "box" che contiene l'imbarcazione sommersa. I valori sono compresi tra 0.5-0.7. Il parametro più difficile da determinare è la spinta T poiché non è nota a priori la resistenza della barca che andrebbe determinata sperimentalmente (che sarà proprio pari alla spinta che dovrà fornire l'imbarcazione). Per superare questo problema si può vedere che nel tempo sono state determinate delle serie standardizzate di eliche che sono state testate sperimentalmente in un numero elevato di configurazioni geometriche e da cui è stato possibile ottenere delle curve di K_t e K_q in funzione del parametro di avanzamento J e il parametro geometrico $\frac{P}{D}$. In questo modo possiamo usare gli appositi diagrammi che sostituiscono le formule [32] [33]. Nel nostro caso abbiamo utilizzato la tabella seguente che rappresenta un'elica B-series con 4 pale e rapporto $\frac{A_e}{A_0}$ pari a 0,6 (questo rapporto indica l'area dello sviluppo superficiale delle pale rispetto all'area del diametro che circonda l'elica).

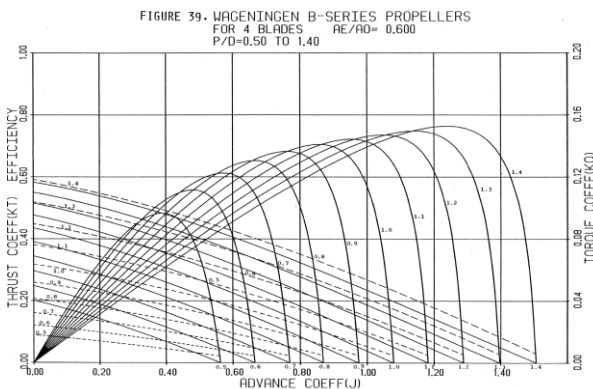


Fig. 21 Diagramma elica B-series

3 Sistema di controllo

In questa sezione verrà mostrato il sistema adottato per il controllo delle potenze erogate dalla Fuel Cell e dalla batteria per ottenere la potenza richiesta dal motore. L'input del sistema è, come detto, la potenza richiesta dal motore per raggiungere le condizioni desiderate. Per questo è stato creato tramite l'utilizzo del blocco '*1-D Look-up Table*' un segnale di ingresso. Quest'ultimo viene inviato al sottosistema '*Controllo della batteria*', dove in input è presente anche il segnale relativo alla SoC. Qui è stata inserita una **Matlab Function** dove sono presenti degli *if-statements* che permettono di ottenere in uscita un segnale in funzione proprio della SoC. Di seguito viene riportato un esempio della logica adottata:

```
if (95 <= soc) && (soc <= 100)
    a = 1;
    b = 0;
end
P_battery_discharge = a*p_motor;
P_battery_recharge = b*P_ric_batt_2;
```

L'output della Function sono due segnali: la potenza della batteria durante la fase di scarica e la potenza della batteria nella fase di ricarica.

In base alla SoC, i due segnali assumeranno un determinato valore, in particolare, la logica di regolazione adottata prevede che:

- Se $SoC \geq 95\%$ la batteria è in grado di erogare la potenza richiesta dal motore fino al suo massimo consentito. Nel caso in cui lo stato di carica si trovasse nel range indicato, ma la potenza richiesta del motore dovesse essere maggiore della potenza massima della batteria, la differenza tra le potenze verrebbe compensata dall'apporto della Fuel Cell.
- Se $40\% \leq SoC < 95\%$ la maggiore quota parte della potenza richiesta viene erogata dalla Fuel Cell, mentre la batteria eroga la restante quota parte per compensarne la differenza. In questo caso è presente un ulteriore controllo (posto nel sottosistema '*Potenza Disponibile Batteria*' presente nel '*Power Management System*') che provvede a calcolare la potenza erogata dalla batteria.
- Se $SoC < 40\%$ la batteria risulta essere in fase di ricarica e la Fuel Cell dovrà erogare un valore di potenza maggiore rispetto a quella richiesta dal motore, che verrà utilizzata proprio per ricaricare la batteria.

I due segnali, a loro volta, vengono inviati nel sottosistema *'Power Management System'*, in cui al suo interno è presente un altro sottosistema *'Power to current'*. In quest'ultimo viene calcolata la potenza che deve essere erogata dalla Fuel Cell e utilizzando la curva caratteristica I-P è possibile ottenere la relativa corrente della FC.

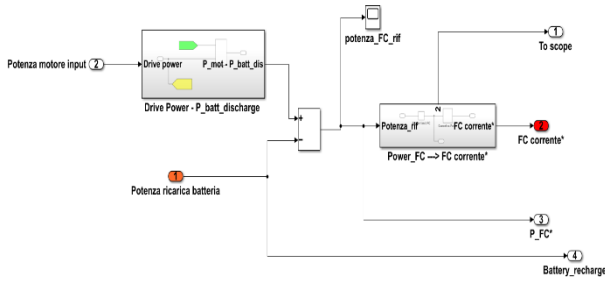


Fig. 22 Power_FC* to Current_FC*

Il valore di corrente ottenuto viene inviato al sottosistema successivo *'FC + Batteria + Electric Motor PMSM'*. In particolare, questo segnale rappresenta l'input del sottosistema *'FC Stack'*. Il segnale corrente in input viene confrontato con il segnale della corrente che sta erogando la FC e ne viene preso il valore minimo. Il segnale che ne deriva viene utilizzato per calcolare la portata volumetrica di idrogeno in ingresso alla Fuel Cell.

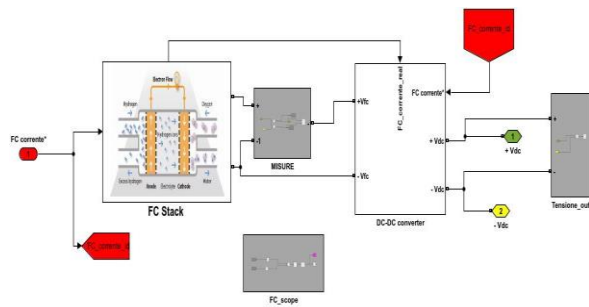


Fig. 23 'Subsystem FC + DC converter'

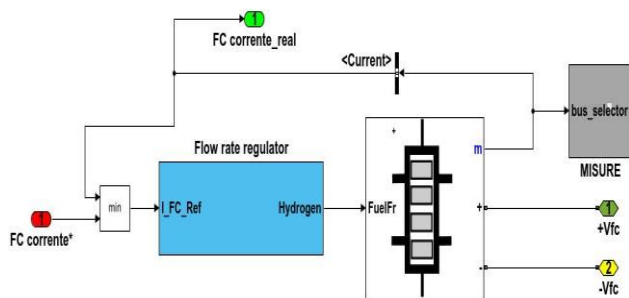


Fig. 24 'Subsystem FC Stack'

4 Simulazioni e Risultati ottenuti

In questa sezione vengono riportati e commentati i risultati ottenuti sulla base delle simulazioni eseguite.

4.1 Simulazione n°1

Con questa simulazione si è voluta riprodurre una ipotetica *'missione'* dell'imbarcazione per un totale di 1440 secondi (24 minuti) che prevede tre fasi consecutive: sailing (partenza ed allontanamento dal molo), cruising (velocità di crociera) e docking (rallentamento e approccio al molo, quest'ultima fase non prevede però il ritorno a zero della velocità). Il totale di distanza percorsa si attesta sui 6 km circa.

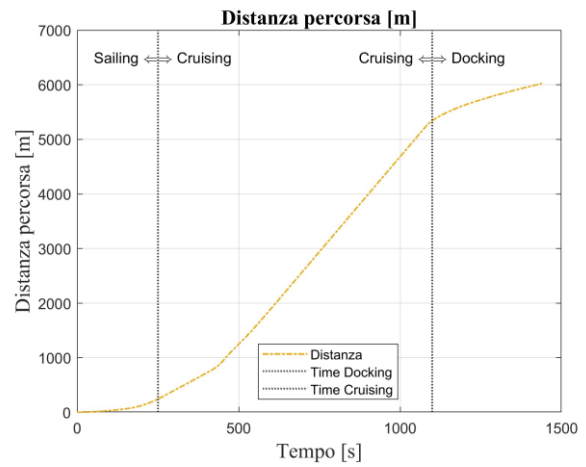


Fig. 25 'Distanza percorsa'

La potenza erogata dal sistema di propulsione è fornita contemporaneamente dalla fuel cell (circa 85kW) e dalla batteria (circa 15 kW) per alimentare il motore che fornirà una potenza di circa 100kW durante la fase di crociera. Queste prestazioni permettono di ottenere una velocità di crociera di circa 13 nodi che riprende proprio quella desiderata in fase di progettazione, quando le caratteristiche della barca sono state scelte per avere un confronto dei risultati con la pubblicazione di Choi et al [11]. In particolare, anche l'andamento delle potenze può essere confrontato fornendo una prova del buon funzionamento del modello elaborato.

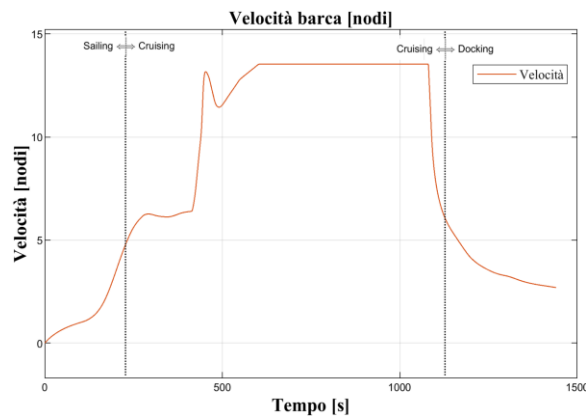


Fig. 26 'Velocità della barca'

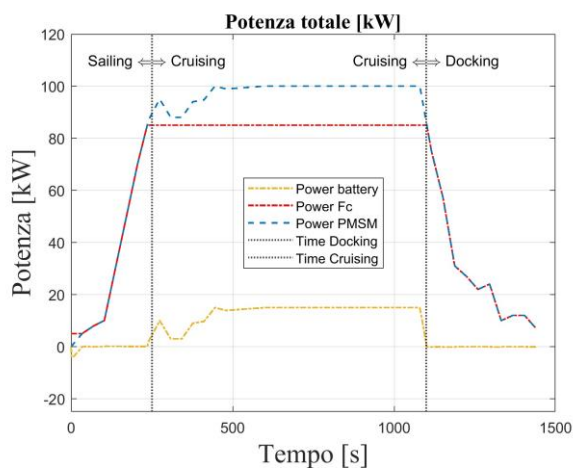


Fig. 27 'Profilo Potenze'

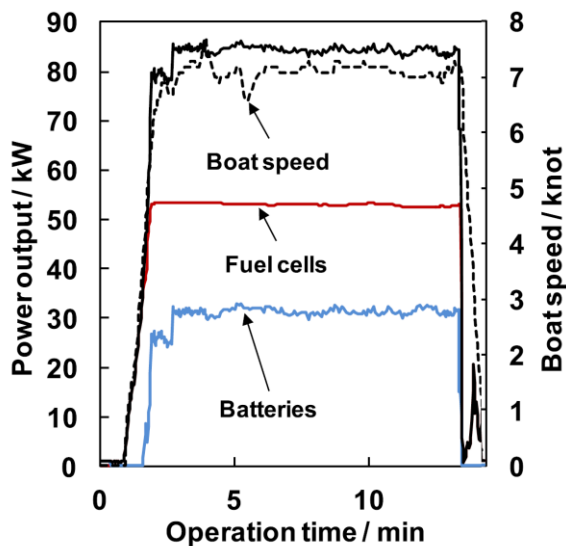


Fig. 28 'Profilo Potenze Choi et al. [11]'

Analizzando in maniera più approfondita i due componenti della propulsione si può fare un'analisi sui consumi che sono stati necessari, per poter eseguire una futura progettazione di dettaglio del serbatoio

contenente l'idrogeno da stoccare e della capacità della batteria. Partendo da quest'ultima si può vedere che la carica per un utilizzo continuativo porta ad una scarica del 10% nel periodo considerato per la simulazione. Inoltre, in Fig. 29 si può notare che l'andamento della SoC ha pendenze differenti a seconda della fase considerata, evidenziando come solo nella fase di cruising la batteria sia maggiormente sollecitata.

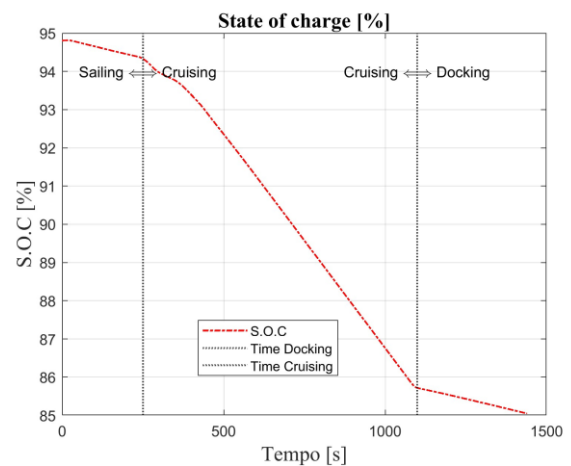


Fig. 29 'SoC batteria'

Per la Fuel Cell, invece, si può osservare che questa opera con una efficienza nella fase crociera di circa il 47% lavorando con un rapporto tra le portate volumetriche aria-combustibile di 4:1, parametro che potrà essere senz'altro utilizzato, in futuro, per una progettazione di dettaglio del sistema di alimentazione della Fuel Cell stessa. Mentre per quanto riguarda i consumi si è ricavato dalla portata volumetrica che per 24 minuti di attività sono stati necessari all'incirca 1.5 kg di idrogeno (utilizzando le equazioni 2.10 e 2.12).

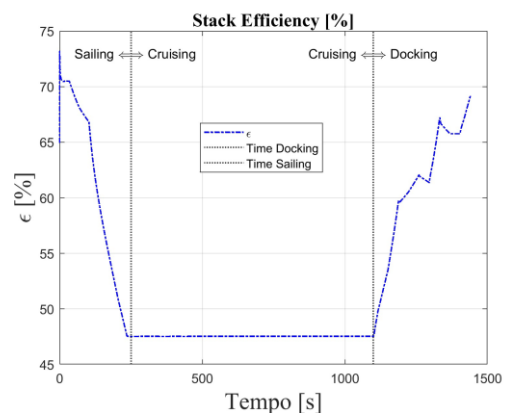


Fig. 30 'Stack efficiency'

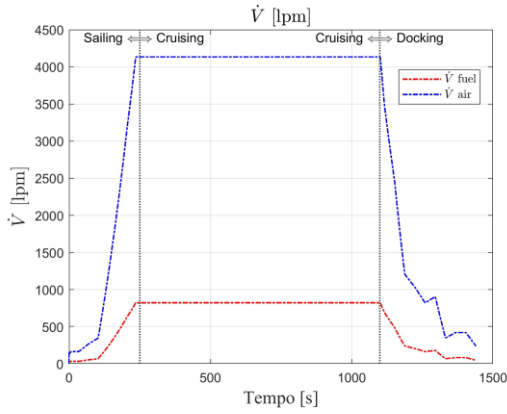


Fig. 31 'Portate volumetriche'

4.2 Simulazioni n° 2-3

In questo paragrafo vengono riportati i risultati ottenuti dalle due simulazioni eseguite (n°2 e n°3). Le simulazioni vogliono confrontare i diversi risultati ottenuti a parità di profilo di potenza richiesto dal motore, ma con diversa SoC di partenza della batteria, e quindi diversa potenza erogata dalla Fuel Cell. Il profilo della missione ipotizzata è della durata di cinque minuti (300 s) e prevede la fase di partenza (sailing) fino ad arrivare ad un valore prossimo a quello della velocità di crociera (cruising). Di seguito viene riportato il profilo delle potenze ottenuto rispettivamente per $SoC(t=0) = 100\%$ e $SoC(t=0) < 95\%$ ($= 94\%$).

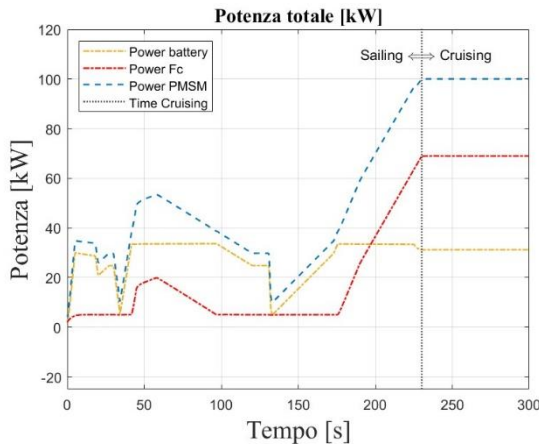


Fig. 32 'Profilo potenze per $SoC(t=0) = 100\%$ '

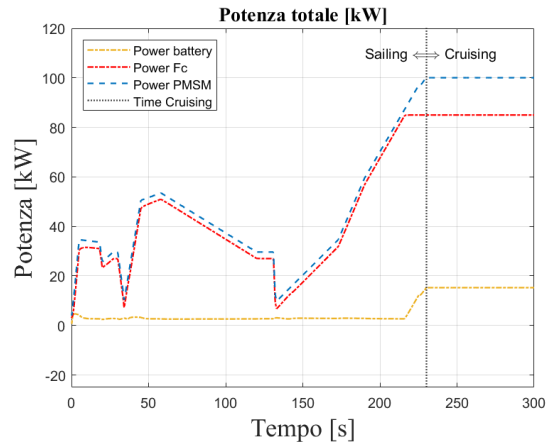


Fig. 33 'Profilo potenze per $SoC(t=0) < 95\%$ '

Dalle due figure soprastanti (32-33) emerge principalmente come nel primo caso la batteria venga utilizzata quasi pienamente (sempre considerando che il minimo valore della potenza erogata dalla FC è pari a 5 kW per i motivi riportati nella sezione 2.1.3), mentre nel secondo caso venga utilizzata per compensare la differenza tra la potenza del motore e quella erogata dalla FC (la cui massima potenza erogabile è stata posta pari a 85 kW).

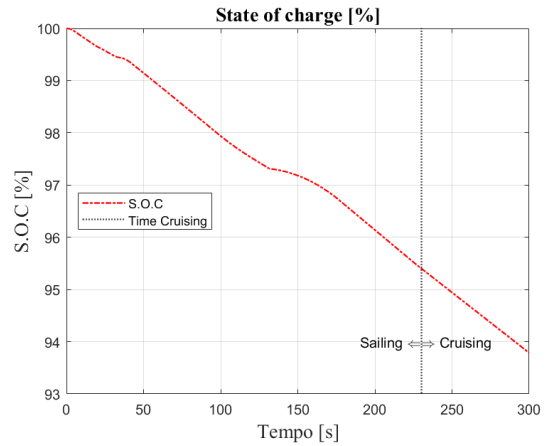


Fig. 34 'SoC batteria per $SoC(t=0) = 100\%$ '

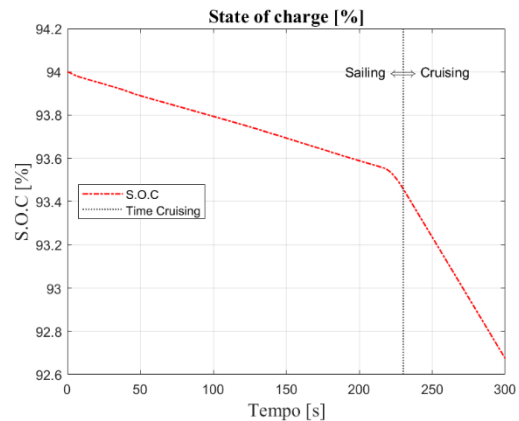


Fig. 35 'SoC batteria per $SoC(t=0) < 95\%$ '

Quanto detto poc'anzi si evince anche dalle figure 34-35 in cui viene riportato l'andamento dello stato di carica per le due simulazioni. Nel primo caso si ha una scarica della batteria di circa 6.3%, mentre nel secondo caso di circa 2.4%. Di seguito vengono riportate le figure che mostrano gli andamenti delle efficienze della FC e delle portate volumetriche:

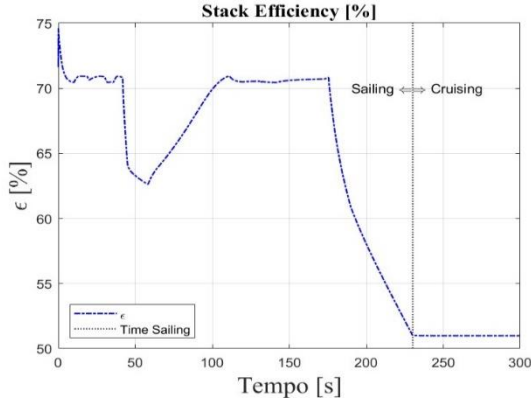


Fig. 36 'Stack efficiency per SoC(t=0) = 100%'

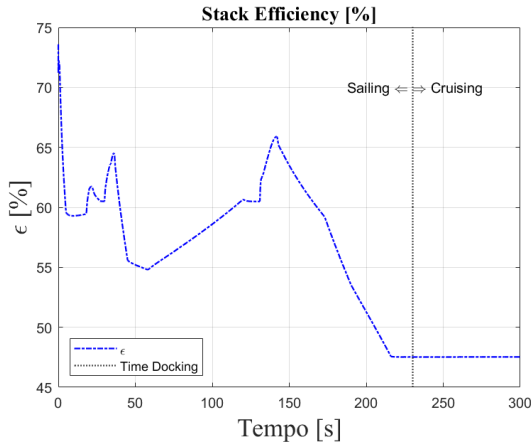


Fig. 37 'Stack efficiency per SoC(t=0) < 95%'

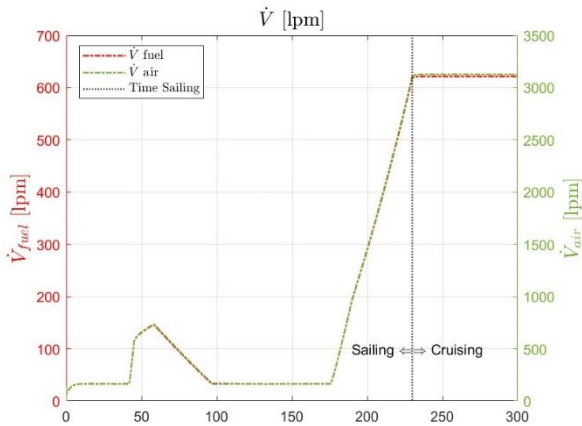


Fig. 38 ' \dot{V}_{H_2} e \dot{V}_{air} [lpm] per SoC(t=0) = 100%'

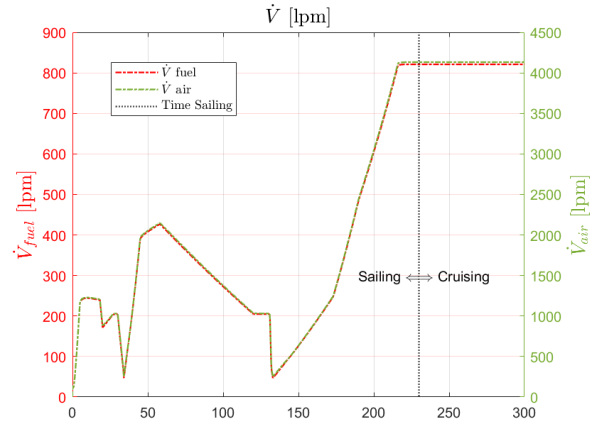


Fig. 39 ' \dot{V}_{H_2} e \dot{V}_{air} [lpm] per SoC(t=0) < 95%'

Dalle figure 36-37 si evince che l'efficienza della FC sia maggiore nel primo caso (SoC(t=0) = 100%). Il risultato è in linea con le aspettative dato che la potenza massima erogata dalla Fuel Cell nella figura 32 è pari a 65kW, valore che risulta essere in un intorno più vicino al punto nominale rispetto al secondo caso. Successivamente vengono riportate per completezza le immagini che mostrano l'andamento della coppia e velocità del motore (Fig.40), della velocità e distanza percorsa dalla barca (Fig.41) e della spinta richiesta (Fig.42).

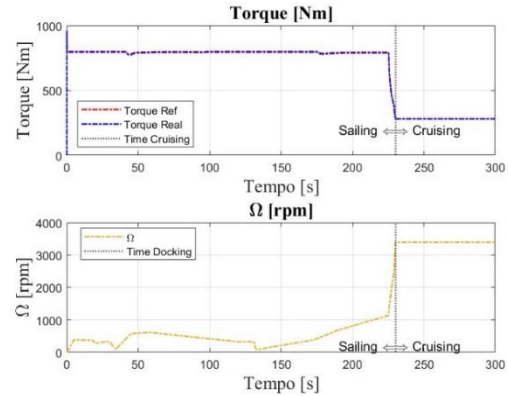


Fig. 40 'Coppia-Velocità Electric Motor PMSM'

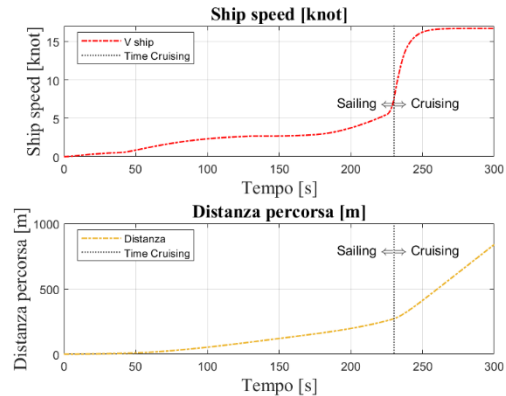


Fig. 41 'Velocità e distanza percorsa dalla barca'

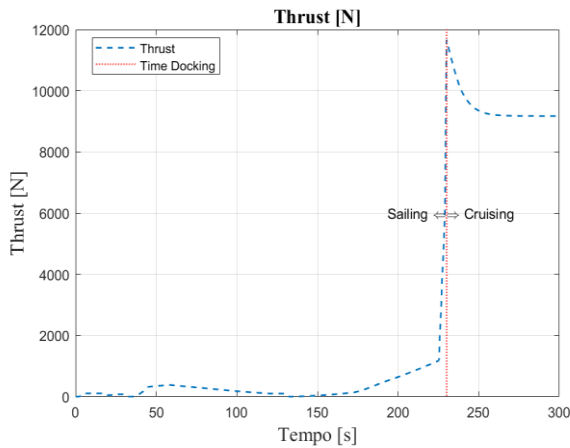


Fig.42 ‘Spinta generata dall’elica’

La quantità di idrogeno (in massa) consumata per le rispettive simulazioni risulta pari a:

- $m_{H_2} = 0.1256 \text{ kg}$ per $\text{SoC}(t=0) = 100\%$
- $m_{H_2} = 0.2394 \text{ kg}$ per $\text{SoC}(t=0) < 95\%$

4.3 Simulazione n°4

In questa simulazione invece si è ipotizzato il caso opposto a quello precedente. Infatti, si è considerata l’imbarcazione a velocità di crociera al tempo $t=0$ s fino a $t = 100$ s. Da questo istante in poi si è ridotta gradualmente la richiesta di potenza del motore per simulazione due diverse situazioni:

- Avvicinamento al porto (sailing);
- Manovre di approccio al molo (docking).

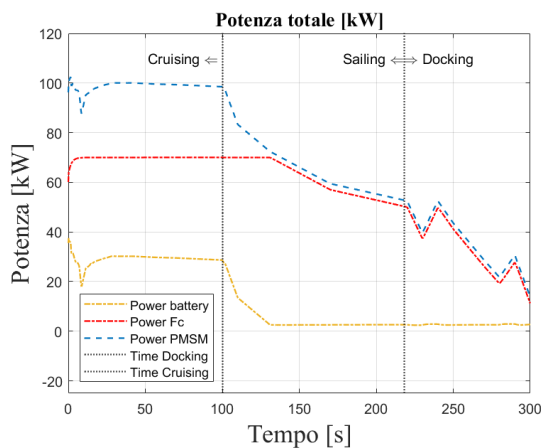


Fig. 43 ‘Profilo potenze’

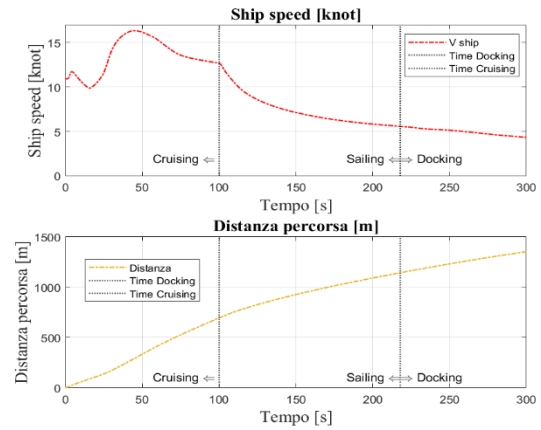


Fig. 44 ‘Velocità e distanza percorsa dalla barca’

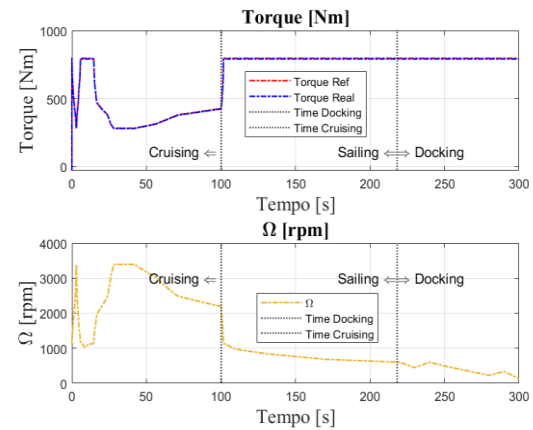


Fig. 46 ‘Coppia-Velocità Electric Motor PMSM’

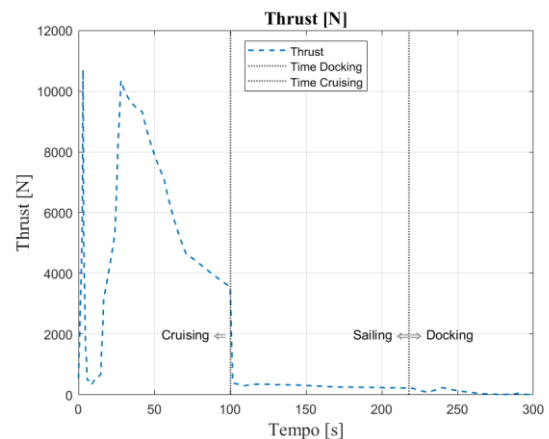


Fig. 45 ‘Spinta generata dall’elica’

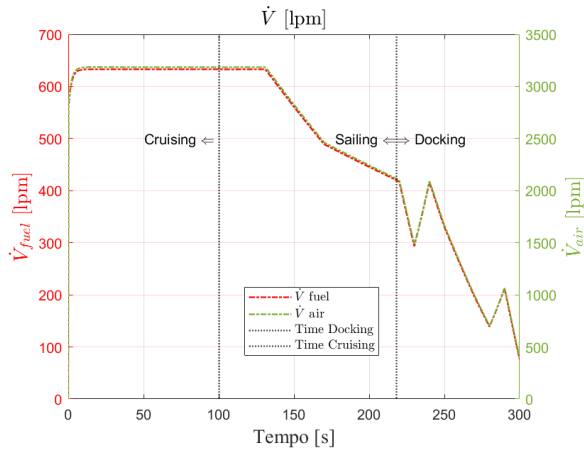


Fig. 47 'portate volumetriche FC'

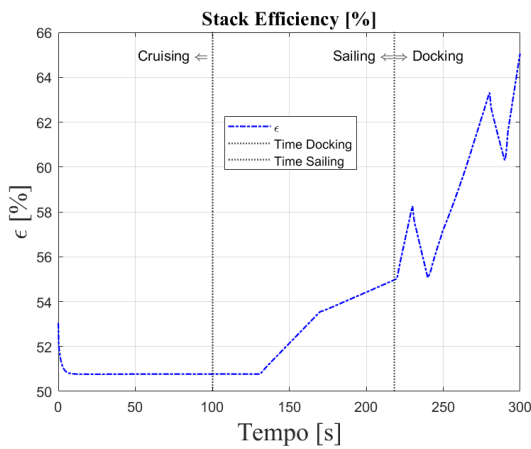


Fig. 48 'Stack efficiency'

La quantità di idrogeno (in massa) consumata risulta essere pari a $m_{H_2} = 0.2653$ kg

4.4 Simulazione n°5

In questo paragrafo viene riportata l'ultima simulazione implementata. In particolare, si è scelto un drive cycle simile al precedente (con alcune modifiche apportate vedi Fig. 43 e 49), ma in questo caso si è ipotizzato che lo stato di carica della batteria al tempo $t=0$ s sia pari al 20%. Pertanto, la potenza erogata Fuel Cell dovrà essere pari alla somma della potenza richiesta dal motore e dalla potenza richiesta dalla batteria per la fase di carica (circa 20kW). Il tempo totale della simulazione questa volta è stato impostato pari a sei minuti (360 s) (rispetto ai cinque minuti del caso precedente). Si riportano di seguito i risultati ottenuti.

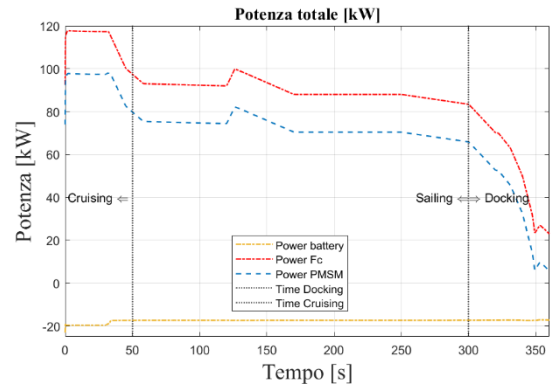


Fig. 49 'Profilo potenze'

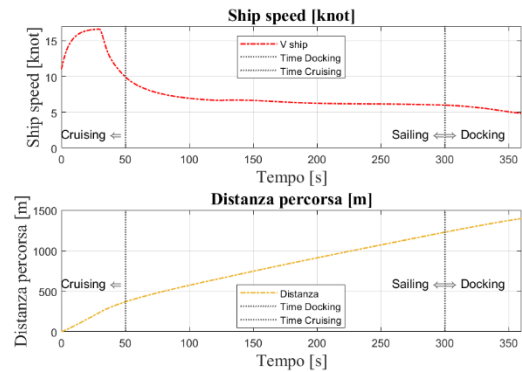


Fig. 50 'Velocità e distanza percorsa dalla barca'

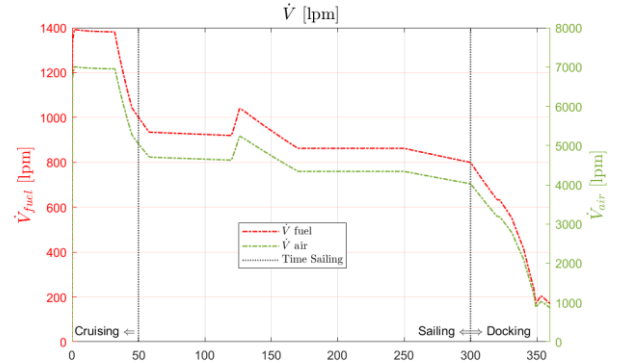


Fig. 51 'portate volumetriche FC'

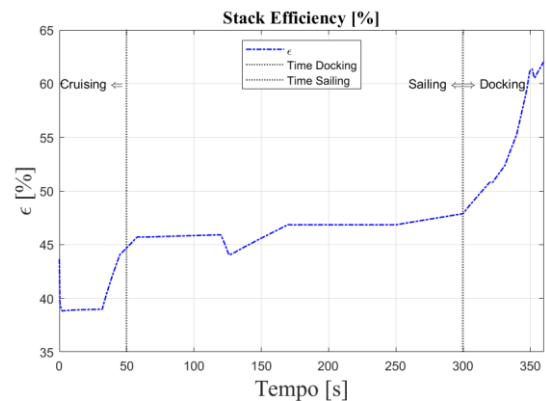


Fig. 52 'Stack efficiency'

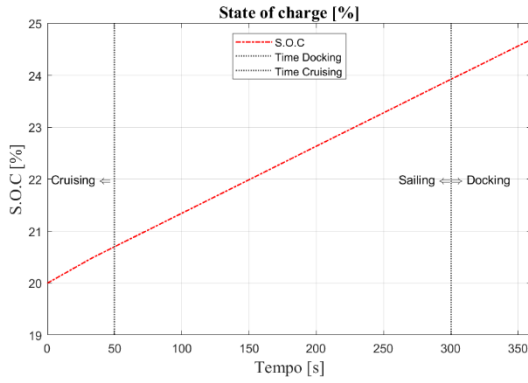


Fig. 53 'SoC batteria'

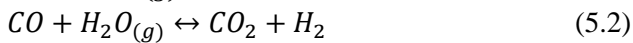
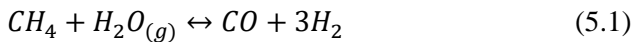
Confrontando questi risultati con quelli ottenuti nella sezione 4.3, risulta evidente, dalle Fig. 48 e 52, come in questa simulazione l'efficienza sia in media notevolmente inferiore. Questo è causato dai diversi punti di lavoro in cui si trova ad operare la FC. Infatti, nei primi 50 secondi, in questa simulazione, la Fuel Cell si trova a lavorare in un intorno prossimo alla potenza massima erogabile. È proprio questa la causa della diminuzione di efficienza.

5 Cenni sulla produzione dell'idrogeno

Generalmente l'idrogeno si trova allo stato gassoso, e raramente si trova nella sua forma pura H_2 , bensì risulta molto abbondante in composti organici ed inorganici come il metano (CH_4) e l'acqua (H_2O) [34]. Esistono due modi per ottenere idrogeno puro:

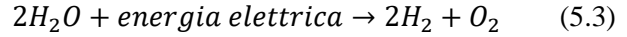
- **Steam reforming**
- **Elettrolisi**

Il primo modo prevede la produzione di H_2 a partire dagli idrocarburi (come il gas naturale CH_4). Considerando, per esempio, proprio il metano, le reazioni chimiche alla base del processo sono le due seguenti:



La 5.1, ovvero la vera e propria reazione di steam reforming, è una reazione endotermica; mentre la 5.2 è detta di water-gas shift ed è una reazione esotermica [35]. L'idrogeno prodotto può essere utilizzato in una Fuel Cell, previa purificazione dello stesso. Risulta chiaro che, utilizzando questo metodo di produzione, comunque venga prodotto un quantitativo di CO_2 non indifferente, circa 9kg di CO_2 equivalenti per kg di H_2 [36]. Con questo processo viene prodotto il cosiddetto **idrogeno grigio**, mentre se si considerasse la cattura e stoccaggio della CO_2 (circa il 90%) si otterrebbe

l'idrogeno blu. L'elettrolisi, invece, prevede la produzione di idrogeno e ossigeno a partire dall'acqua, utilizzando energia elettrica. In dettaglio, l'elettrolisi dell'acqua avviene quando una corrente continua è fatta passare tra due elettrodi immersi in un'opportuna soluzione acquosa (soluzioni concentrate di idrossido di potassio o di acido solforico) e separati tra loro da particolari materiali (diaframmi o separatori), dando luogo alla decomposizione elettrolitica dell'acqua secondo la reazione globale [37]:



Si producono così separatamente idrogeno (al catodo) ed ossigeno (all'anodo) di elevata purezza, successivamente sottoposti a vari processi (raffreddamento, deumidificazione, etc.) che li rendono disponibili per un immediato utilizzo [37]. Un'importante considerazione da fare è che, se l'energia elettrica utilizzata in questa applicazione venisse ancora prodotta da fonti fossili, la quantità di CO_2 prodotta sarebbe ancora considerevole. Invece, se l'energia elettrica fosse prodotta da fonti rinnovabili si otterrebbe il cosiddetto **idrogeno verde** [16]. Ad oggi i costi di produzione di quest'ultimo sono ancora abbastanza elevati se confrontati con l'idrogeno prodotto da steam reforming. A prova di ciò, l'idrogeno prodotto mediante elettrolisi attualmente rappresenta solo il 5% circa della produzione totale. Il motivo principale della sua così bassa produzione è da ricercarsi nei costi necessari, significativamente più elevati rispetto all'altro metodo [36]. Tuttavia, si stima che entro il 2030-2032 il costo di produzione dell'idrogeno verde sarà minore (o pari) rispetto all'idrogeno blu [38]. Di seguito vengono riportati due grafici che mostrano rispettivamente le fonti di energia utilizzate per la produzione di idrogeno e i costi di produzione nel 2021, 2022 e nello scenario previsto dal Net Zero Emissions per il 2030 [36].

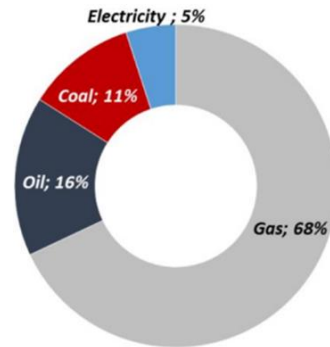


Fig. 54 % delle fonti di energia utilizzate per la produzione di idrogeno

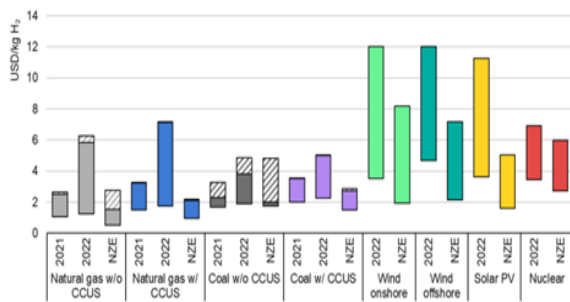


Fig. 55 costi di produzione nel 2021, 2022 e nello scenario previsto dal Net Zero Emissions per il 2030

6 Conclusioni e possibili sviluppi futuri

L'obiettivo principale di questo articolo è stato quello di implementare un modello (in Matlab) della parte propulsiva di una imbarcazione ibrida alimentata con Fuel cell e batteria. Sono state simulate alcune 'missioni' comuni considerando anche un drive cycle implementato da Choi et al. [11] per confrontare i risultati da noi ottenuti con dei risultati realistici. Dei possibili sviluppi futuri dovrebbero essere i seguenti:

- Modellazione del sistema di raffreddamento del pacco batterie e Fuel Cell;
- Ottimizzazione della fase di scarica e carica della batteria;
- Modellazione serbatoio e sistema di alimentazione della Fuel Cell (valvole, compressori, etc.);
- Modellazione di dettaglio dell'imbarcazione (scafo, elica, etc.);
- Analisi dei costi e confronto con le attuali tipologie di imbarcazioni alimentate da combustibili fossili;
- Sistemi ausiliari (luci di bordo, etc.).

Bibliografia

- [1] <https://www.consilium.europa.eu/it/policies/climate-change/paris-agreement/#what>
- [2] <https://www.europarl.europa.eu/news/it/headlines/society/20191129STO67756/emissioni-di-aerei-e-navi-dati-e-ci-fire-infografica>
- [3] <https://www.cnr.it/it/comunicato-stampa/10192/trasporto-marittimo-qual-e-impatto-su-salute-e-ambiente>
- [4] https://it.wikipedia.org/wiki/Impatto_ambientale_della_navigazione#Gas_di_scarico
- [5] Dynamic Modelling of Fuel Cell Systems for Electric Propulsion, Shakeri, Zadeh
- [6] An Energy Management System of a Fuel Cell/Battery Hybrid Boat, Han, Charpentier, Tang
- [7] https://en.wikipedia.org/wiki/Proton-exchange_membrane_fuel_cell
- [8] Simulink Based Modeling of Fuel Cell and Rechargeable Battery Powered Electric Vehicle, Zenk
- [9] Elettronica Industriale 1, Azionamenti con Motore in Corrente Alternata, Armando Bellini.
- [10] <https://www.tema.hr/it/marine/>
- [11] Development and demonstration of PEM fuel-cell-battery hybrid system for propulsion of tourist boat, Choi et al.
- [12] FACULTY OF ENGINEERING AND THE ENVIRONMENT, Doctor of Philosophy, USE OF VOYAGE SIMULATION TO INVESTIGATE HYBRID FUEL CELL SYSTEMS FOR MARINE PROPULSION, by Ameen Bassam.
- [13] The PEM fuel cell system with DC/DC boost converter: Design, modeling and Simulation, <https://www.researchgate.net/publication/228352547>.
- [14] Fuel Cell Systems Explained II ed. J.Larminie e A. Dicks J.Wiley e Sons, 2003
- [15] Implement generic hydrogen fuel cell stack model - Simulink - MathWorks Italia
- [16] HydrogenPoweredShip PropulsionforHigh-Speed Craft The ImplementationofFuelCell BatteryPropulsionSystems M.Boekhout.
- [17] <https://howtostoreelectricity.com/battery-soc>
- [18] Elettronica di Potenza A. Bellini – S. Bifaretti – S. Costantini
- [19] Elettronica Industriale 2, Azionamenti con Motore in Corrente Alternata, Armando Bellini.
- [20] Appunti del corso di Azionamenti Elettrici e Reti di Distribuzione (Università di Roma Tor Vergata), Prof. Ing. Stefano Bifaretti, Prof. Ing. Vincenzo Bonaiuto.
- [21] Three-phase permanent magnet synchronous machine with sinusoidal or trapezoidal back electromotive force, or five-phase permanent magnet synchronous machine with sinusoidal back electromotive force - Simulink - MathWorks Italia
- [22] Field-Weakening Control - MATLAB & Simulink (mathworks.com)
- [23] Basic Principles of Ship Propulsion, MAN energy solution
- [24] The Wave Making Resistance Evaluation of The Fishing Ship with Skeg Using Tent Function Method, Sulisetyono
- [25] Resistance and Powering of Ships, Chapter 7, United States Naval Academy pag 9
- [26] Marine Propellers and Propulsion, Second Edition, Carlton
- [27] Propeller Handbook, the complete reference for choosing, installing and understanding boat propellers, Gerr pag 52
- [28] <https://it.linkedin.com/pulse/lelica-navale-per-tutti-giuseppe-tusceri>
- [29] Progetto dell'elica, Dipartimento Ingegneria Navale Trieste, Trincaspag76
- [30] Propeller and Propulsion pg.52
- [31] <https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/wake-fraction-coefficient#:~:text=The%20speed%20of%20advance%20of,wake%20fraction%20coefficient%20%E2%80%9Cw%E2%80%9D.>
- [32] Hydrodynamics for Ocean Engineers, Techet pg.15
- [33] Development of a Simulation Model for Propeller Performance, Dalheim pg.4
- [34] I costi dell'Idrogeno conoscerli per imparare a ridurli Giuseppe Zollino Università di Padova - Consorzio RFX. ANIMP, 26 maggio 2021.
- [35] Appunti del corso di Progetto di Macchine, Prof. Ing. Michele Manno, Università degli Studi di Roma Tor Vergata.
- [36] IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY- Global Hydrogen Review 2023
- [37] <https://www.researchgate.net/publication/267841966> La produzione dell'idrogeno mediante elettrolisi Article · December 2010
- [38] Idrogeno 2022, le previsioni di BloombergNEF - Rinnovabili.it