

**ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA**

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA ENERGETICA

TESI DI LAUREA

In

Sistemi Energetici Avanzati e Cogenerazione

**ANALISI E OTTIMIZZAZIONE DI SISTEMI DI
PROPULSIONE IBRIDI PER LA NAVIGAZIONE**

RELATORE

Chiar.mo Prof. Francesco Melino

CANDIDATO

Stefano Rotella

CORRELATORE

Chiar.mo Prof. Michele Bianchi

Anno Accademico 2018/19

Sessione III

INDICE

Introduzione	7	
1	Introduzione del trasporto navale e del cold ironing	9
1.1	Panorama energetico	9
1.2	Trasporto marittimo	14
1.2.1	IMO	15
1.2.2	MARPOL 73/78	15
1.2.3	Annesso IV	16
1.2.4	Aree ECA	20
1.3	Cold ironing	21
1.3.1	Allacciamento	23
1.3.2	Esempi di cold ironing	26
1.3.3	Analisi costi-benefici	28
1.4	Emissioni dei motori ad accensione spontanea	31
1.4.1	Metodi di abbattimento degli NO _x	34
1.4.2	Metodi di abbattimento degli SO _x	35
1.4.3	Metodi di abbattimento del PM	36
2	Motori navali	38
2.1	Storia dei propulsori	38
2.2	Progettazione dei propulsori	40
2.3	Macchine marine	41
2.3.1	Fonti energetiche delle macchina marine	44
2.3.2	Motore diesel	44
2.3.2.1	Motore diesel a 4 tempi	46
2.3.2.2	Motore diesel a 2 tempi	48
2.3.2.3	Confronto fra il 2 tempi ed il 4 tempi	49
2.3.2.4	Parametri caratteristici dei motori diesel	50
2.3.2.5	Curve caratteristiche dei motori diesel	52
2.3.2.6	Gestione del carico del motore diesel	53
2.4	Cogenerazione e trigenerazione	55
2.4.1	Rendimenti della cogenerazione e modi di operare	56
2.4.2	Gruppi cogenerativi con motore alternativo	57

3	Analisi e ottimizzazioni di motori ibridi	59
3.1	Descrizione del caso preso in analisi	59
3.2	Cenni su VBA	63
3.3	Logica del modello	65
3.3.1	Inserimento dei dati di input	65
3.3.2	Layout dei dati di output	66
3.3.3	Irraggiamento	70
3.3.4	Distribuzione dei carichi nel motore ibrido	72
3.3.5	Metodi risolutivi usati all'interno del codice	76
3.3.6	Problema della carica della batteria: aggiornamento della SOC	80
3.3.7	Bilancio energetico: cenni sulle approssimazioni introdotte	81
3.3.8	Risultati del modello nella condizione standard	83
3.3.8.1	Il foglio "Bilancio"	83
3.3.8.2	Gennaio	84
3.3.8.3	Aprile	88
3.3.8.4	Luglio	90
3.3.8.5	Ottobre	93
3.3.8.6	Conclusioni del caso standard	97
3.3.9	Simulazioni	98
3.3.9.1	Simulazione 1	98
3.3.9.1.1	Gennaio	99
3.3.9.1.2	Aprile	100
3.3.9.1.3	Luglio	102
3.3.9.1.4	Ottobre	103
3.3.9.1.5	Conclusioni della simulazione 1	104
3.3.9.2	Simulazione 2	105
3.3.9.2.1	Gennaio	105
3.3.9.2.2	Aprile	107
3.3.9.2.3	Luglio	108
3.3.9.2.4	Ottobre	109
3.3.9.2.5	Conclusioni della simulazione 2	110
3.3.9.3	Simulazione 3	111
3.3.9.3.1	Gennaio	112
3.3.9.3.2	Aprile	116
3.3.9.3.3	Luglio	120
3.3.9.3.4	Ottobre	123
3.3.9.3.5	Conclusioni della simulazione 3	127

3.3.9.4	Simulazione 4	128
3.3.9.4.1	Gennaio	129
3.3.9.4.2	Aprile	132
3.3.9.4.3	Luglio	135
3.3.9.4.4	Ottobre	137
3.3.9.4.5	Conclusioni della simulazione 4	138
3.3.9.5	Simulazione 5	139
3.3.9.5.1	Gennaio	140
3.3.9.5.2	Aprile	146
3.3.9.5.3	Luglio	150
3.3.9.5.4	Ottobre	154
3.3.9.5.5	Conclusioni della simulazione 5	158
3.3.9.6	Simulazione 6	159
3.3.9.6.1	Gruppo frigorifero ad assorbimento	159
3.3.9.6.2	Risultati	161
3.3.9.6.3	Conclusioni della simulazione 6	165
4	Conclusioni	166
	Bibliografia	168
	Abbreviazioni e acronimi	172
	Elementi e composti chimici	174
	Appendice A	176

INTRODUZIONE

L'inquinamento dovuto alle emissioni da combustibile fossile è un problema che coinvolge tutto l'essere umano e di cui se ne parla da poco più di una decina di anni. In questa tesi si fa un *focus* sul settore di trasporti marittimo ed in particolare su il problema delle emissioni che lo coinvolge a causa di limiti di emissione meno severi.

Limiti meno stringenti però implicano delle zone con concentrazioni di inquinanti nelle aree limitrofe ai porti, ed in particolare più grande è il porto e maggiore sarà evidente tale problema.

Il problema di elevate concentrazioni di inquinanti nelle aree limitrofe a quella portuale succede siccome delle tipologie di nave, per citarne alcune crociere, mercantili e petroliere, anche una volta arrivate a destinazione avranno una domanda di energia. Per soddisfarla i motori della nave dovranno restare in funzione.

La seguente tesi si basa su un tragitto di una petroliera ed è stata analizzata l'integrazione del cold ironing al motore già presente nella nave. Sono state analizzate varie versioni oltre a quella con il cold ironing, si sono modificati sia parametri di componenti facenti parte del motore ibrido della nave aggiungendo dei componenti per quantificare il loro impatto su questa analisi. Ogni analisi è atta alla riduzione di combustibile e quindi per ridurre le emissioni sia durante i periodi in cui è in mare aperto che quando ormeggiata in porto, in quest'ultimo caso usando il cold ironing.

Si vuole sottolineare che il cold ironing non elimina le emissioni prodotte, siccome ad oggi l'elettricità generata ha ancora un'origine principalmente da combustibile fossile, però viene generata dovendo rispettare dei limiti sulle emissioni molto più stringenti. Inoltre come verrà riportato nel capitolo 1 dell'elettricità prelevata dalla rete elettrica una parte è di origine di fonte rinnovabile.

CAPITOLO 1

INTRODUZIONE DEL TRASPORTO NAVALE E DEL COLD IRONING

1.1 PANORAMA ENERGETICO

La fornitura di energia primaria ha visto un andamento crescente dal 1971 fino ad oggi aumentando di 2,5 volte il suo valore. Partendo da una richiesta di 5.519 Mtoe (Millions tonnes of oil equivalent) nel 1971 si è arrivati ad una fornitura di 13.972 Mtoe nel 2017. Questa richiesta di energia è fornita attraverso varie fonti energetiche, in figura 1.1 è rappresentata la suddivisione delle fonti energetiche usate:

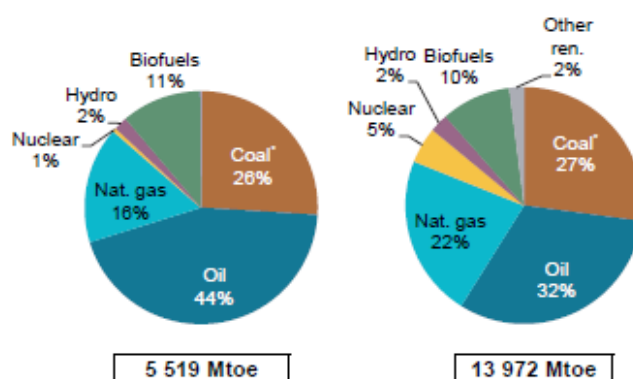


Figura 1.1 Fornitura di energia primaria mondiale [1]

Si può notare dalla figura 1.1 che le fonti energetiche più usate sono i combustibili fossili. Carbone, petrolio e gas naturale danno un contributo costante negli anni attorno al 75%.

Il consumo di energia non è ripartito equamente in tutte le aree mondiali, ma ci sono aree più energivore e aree che lo sono meno. Tali aree negli anni non hanno avuto una domanda costante, come si può notare dalla figura 1.2:

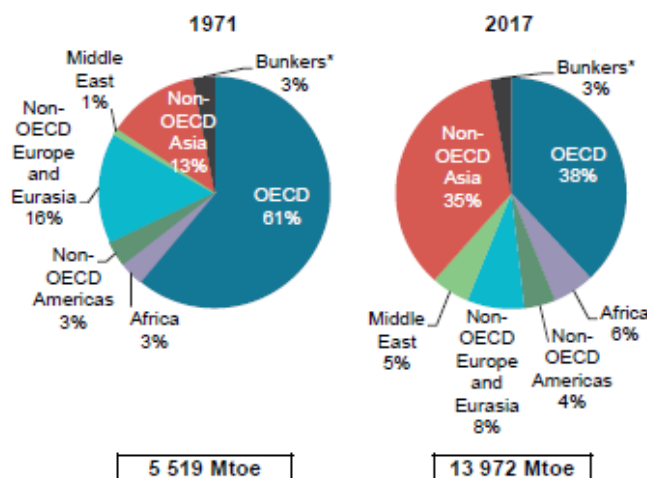


Figura 1.2 Partizione della energia nelle regioni [1]

La causa principale dell'aumento della richiesta di energia primaria è lo sviluppo dei paesi Non-OECD, questo è dettato dal loro sviluppo demografico ed economico. Dai due anni campione analizzati nelle figure 1.1 ed 1.2 si può ricavare che 4.173 Mtoe dell'aumento complessivo di 8.453 Mtoe di energia primaria consumata sono attribuibili a questa regione.

Per comprendere chi non appartiene all'OECD bisogna prima fare una piccola digressione su cos'è e di cosa si occupa l'OECD. The Organization for Economic Co-operation and Development (OECD) è un'organizzazione che si occupa di migliorare le politiche internazionali e di andare a trovare soluzioni su argomenti di carattere sociale, economico ed ambientale. Attualmente la OECD è composta da 36 paesi membri.

L'andamento del consumo dell'energia totale primaria si prevede in aumento negli anni, la figura 1.3 è stata ottenuta attraverso un modello di previsione World Economic Outlook (WEO):

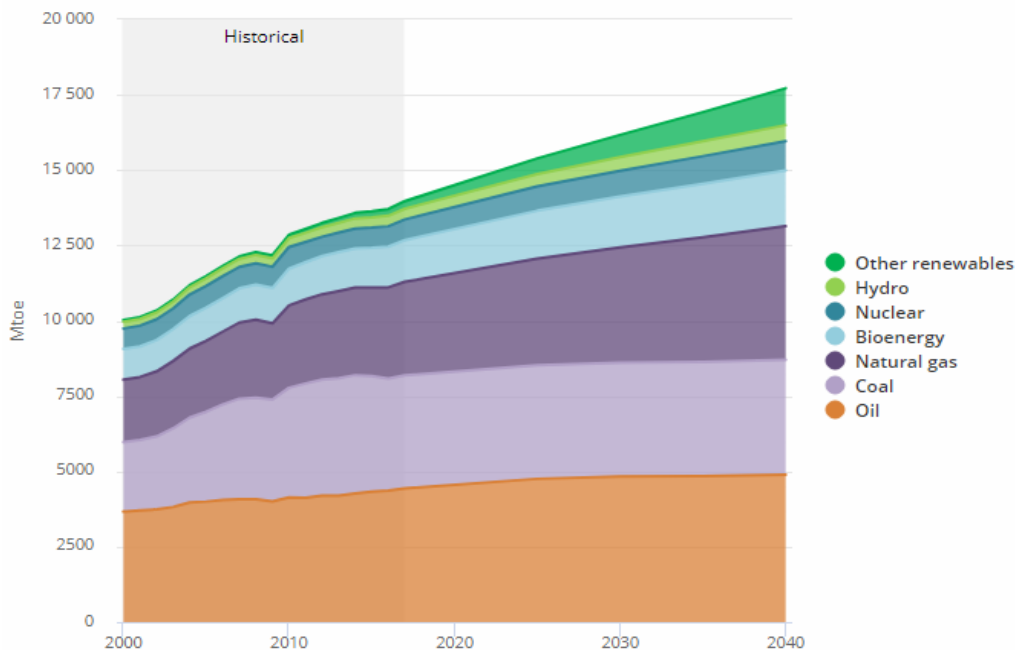


Figura 1.3 Previsione della domanda di energia totale primaria ottenuta attraverso WEO model con una previsione NPS [2]

Dalla figura 1.3 si noti che certe fonti energetiche, tra cui il carbone, il nucleare, l'idroelettrico e le bioenergie, non sono previste in crescita, mentre altre fonti energetiche quali le energie rinnovabili, il gas naturale ed il petrolio sono previste in aumento.

Nel caso di consumo finale totale si possono distinguere diversi settori, tra i più energivori troviamo il settore industriale e quello dei trasporti. Quest'ultimo, negli anni, ha avuto un incremento percentuale sul consumo totale, anch'esso in aumento come riportato nei grafici a torta di figura 1.4:

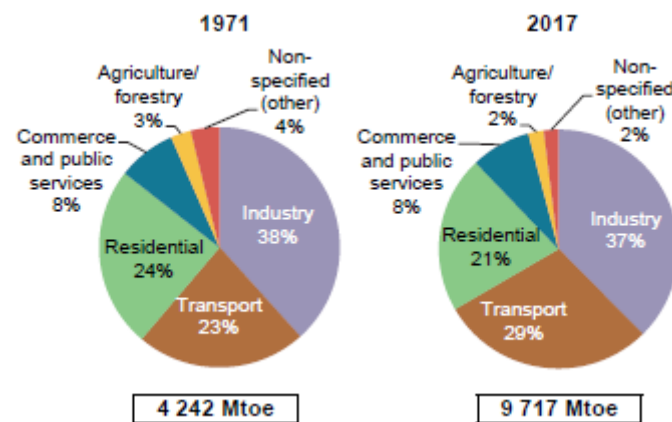


Figura 1.4 Consumo energetico mondiale nei settori principali [1]

L'aumento percentuale del settore dei trasporti (dal 23% del 1971 al 29% nel 2017) è il dato che salta più all'occhio, vedi Tabella 1.1:

	1971			2017			Incremento dal 1971 al 2017 [Mtoe]
	%	Consumo totale [Mtoe]	Consumo parziale [Mtoe]	%	Consumo totale [Mtoe]	Consumo parziale [Mtoe]	
Settore trasporti	23	4.242	975,66	29	9.717	2.817,93	1.842,27

Tabella 1.1 confronto fra i due anni presi a campione

Per settore dei trasporti si intende tutto ciò che comprende uno spostamento fisico di esseri umani oppure di beni. Nel settore dei trasporti adibito per il trasporto umano troviamo come mezzi più comuni: le automobili, i bus, i veicoli a 2 o 3 ruote, gli aeroplani ed i treni. Nel settore del trasporto merci i mezzi più usuali sono: i camion, le *pipelines*, i treni merci ed infine le navi.

Il settore dei trasporti, secondo le previsioni fatte, avrà un aumento annuo dell'1,4% dal valore storico di $104 \cdot 10^{15}$ Btu (British thermal unit) del 2012 fino ad arrivare al valore stimato di $155 \cdot 10^{15}$ Btu nel 2040 [3]. Questo *trend* è dovuto principalmente agli stati non facenti parte della OECD, ovvero i paesi raggruppati all'interno dell'insieme che chiameremo Non-OECD.

Fra i paesi più influenti del Non-OECD troviamo India e Cina. L'India ha visto una crescita economica, un'industrializzazione ed una urbanizzazione dal 1950 in poi. Come conseguenza si ha avuto un aumento dell'uso di energia, in media si ha un aumento del 6% annuo. A seguito di studi usando un metodo misto fra Engle-Granger Approach e Standard Granger si trovò una relazione bidirezionale tra consumo energetico e crescita economica, in particolare si trovò una

relazione di lungo periodo della crescita economica in funzione del consumo di energia ed una relazione di breve periodo del consumo di energia in funzione della crescita economica [4].

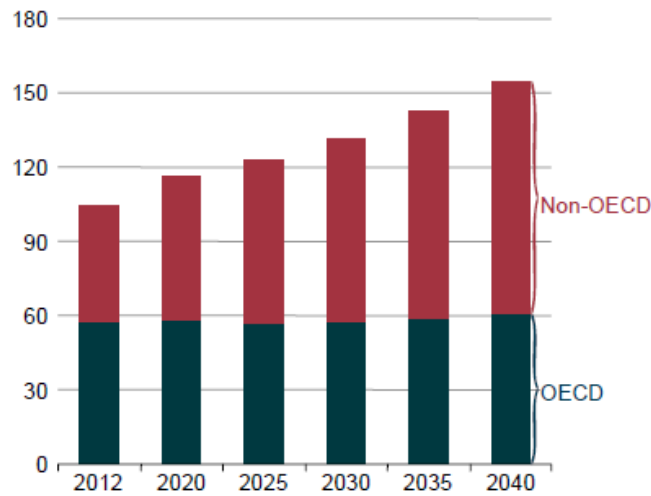


Figura 1.5 Consumi energetici nel settore trasporti [10^{15} Btu – anni] [3]

All'interno del settore del trasporto si ha l'uso di diversi combustibili. Tra i più usati ci sono il diesel e il motor gasoline che contano attualmente attorno il 75% d'impiego nel settore trasporti:

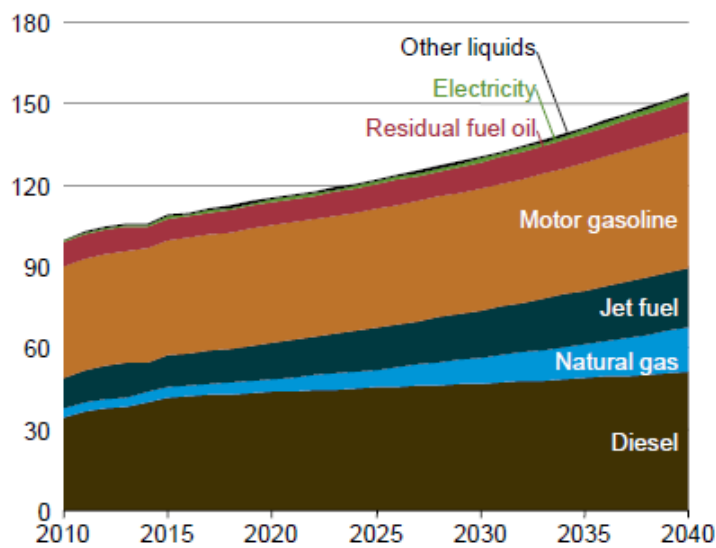


Figura 1.6 Consumi energetici nel settore trasporti per fonte energetica [10^{15} Btu – anni] [3]

Il settore trasporti viene suddiviso in due macro-gruppi, quello Passenger che si occupa del trasporto delle persone e quello del Freight che invece comprende tutto il mercato che si occupa del trasporto di beni.

Il gruppo Passenger è più energivoro del Freight, come si può osservare dalla figura 1.7. Il settore Freight risulta essere meno energivoro del solo sottogruppo light-duty vehicle appartenente al gruppo Passenger:

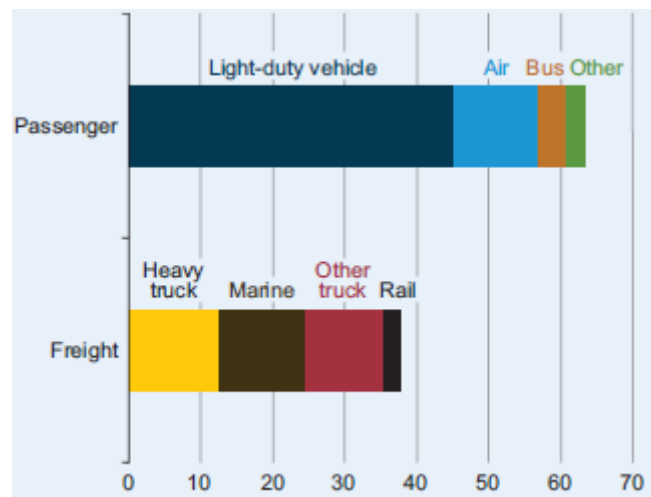


Figura 1.7 Consumi energetici del settore trasporti per tipologia di trasporto [3]

Inoltre dalla figura 1.7 si può osservare che il settore del trasporto marino è poco energivoro se considerato in una visione globale.

1.2 TRASPORTO MARITTIMO

Le navi possono essere catalogate secondo varie peculiarità. Una di queste è il tipo di servizio fornito dalla nave, in tale suddivisione troviamo le navi adibite al trasporto merci.

All'interno di questa voce troviamo un'ulteriore suddivisione in funzione della tipologia di merce che la nave trasporterà. A seconda della merce trasportata la nave cambierà in conformazione, in materiali usati per la sua costruzione, nei tragitti che percorrerà e di conseguenza dei porti che frequenterà [5].

- Navi bananiere: destinate al trasporto di carico refrigerato, congelato e surgelato;
- Navi porta container: destinate al trasporto di merci contenute all'interno di container;
- Navi Ro-Ro: destinate al trasporto di merci contenute in pianali o su autoveicoli;
- Navi lash: destinate al trasporto di contenitori che possono galleggiare;
- Navi portarinfuse: destinate al trasporto di materiale che sarebbe difficile da contenere all'interno di container;
- Navi cisterne: destinate al trasporto di merci liquide o gassose;
- Navi polivalenti.

Il settore trasporti marittimi è per sua natura internazionale dato che le navi sopracitate possono transitare in acque internazionali. Questo porta alla necessità di avere leggi internazionali che regolino le emissioni.

La necessità di avere delle limitazioni sulle emissioni del settore del trasporto marittimo è dovuto alle ingenti quantità di sostanze inquinanti emesse. I gas di scarico delle navi vengono ritenute un'alta fonte di inquinamento atmosferico, fra gli inquinanti più rilevanti abbiamo gli ossidi di azoto (NO_x) e gli ossidi di zolfo (SO_x) [6].

La protezione dell'ecosistema marino ha iniziato ad essere uno dei più importanti problemi ecologico-ambientali dei tempi moderni. Le fonti di inquinamento marino di origine antropomorfa sono svariate, le più importanti sono: navi, piattaforme *off-shore* ed impianti industriali *on-shore*.

Negli anni la regolamentazione della sicurezza di navigazione, della sicurezza marittima e dell'inquinamento da navi ha avuto una crescita costante, nonostante ciò si ha sempre avuto la presenza frequente di incidenti che portavano ad inquinamento. Perciò la più ovvia conclusione è che le norme regionali, nazionali ed internazionali, le quali sono state principalmente emanate dall'International Maritime Organization (IMO), non sono state adeguatamente rinforzate ed/o applicate [7].

1.2.1 IMO

A seguito della necessità di migliorare la sicurezza in mare, si sentì il bisogno di sviluppare una regolamentazione internazionale. Così nel 1948 nacque Inter-Government Maritime Consultative Organization (IMCO) che in seguito venne rinominato IMO nel 1982.

Si può affermare che l'IMO è l'organo regolatore incaricato di coordinare e sorvegliare i problemi in ambito di sicurezza marittima e di prevenzione all'inquinamento da fonte navale. Oggi l'IMO conta 174 stati membri.

Prima che le norme emesse dall'IMO divengano legalmente vincolanti, devono essere rispettate delle condizioni minime.

Tipicamente sono richiesti un certo numero minimo di stati membri che le adottino e che la somma dei loro scambi commerciali non siano inferiori ad una certa percentuale del tonnellaggio lordo mondiale [8].

Il primo obiettivo dell'IMO fu di approvare una nuova versione dell'International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS). Negli anni successivi emerse un nuovo problema su cui concentrarsi a seguito del disastro di Torrey Canyon del 1967: l'inquinamento.

Sul tema inquinamento il più importante dei protocolli emesso dall'IMO è noto con il nome di Marpol 73/78.

1.2.2 MARPOL 73/78

La conferenza di Stoccolma del 1972 mise in evidenza le debolezze del OILPOL 54, in particolar modo perché era una regolamentazione limitata solamente al petrolio.

Il risultato della conferenza del 1973 fu un nuovo strumento di regolazione, The International Convention for the Prevention of Pollution from Ships comunemente noto come MARPOL 73/78.

Questa convenzione risulta essere il frutto, in origine, della combinazione di due trattati, l'OILPOL 54 e la conferenza TSPP del 1978. Negli anni ha subito numerose modifiche ed integrazioni.

La MARPOL 73/78 regola tutti gli aspetti tecnici per la prevenzione dell'inquinamento dalle navi.

Gli aspetti operativi di MARPOL 73/78 si trovano suddivisi in 5 annessi ognuno riguardante un diverso argomento [9].

- Annesso I: prevenzione dall'inquinamento da prodotti petroliferi;
- Annesso II: prevenzione dall'inquinamento da sostanze nocive liquide trasportate in grossi quantitativi;
- Annesso III: prevenzione dall'inquinamento da sostanze pericolose trasportate impacchettate;
- Annesso IV: Prevenzione dall'inquinamento da acque di scarico;
- Annesso V: Prevenzione dall'inquinamento da rifiuti.

Una nazione che aderiva inizialmente alla convenzione MARPOL 73/78 doveva aderire fin da subito agli annessi I e II, mentre poteva decidere se aderire o meno ai restanti annessi.

Gli annessi sono entrati in vigore rispettivamente negli anni 1983, 1987, 1992, 2003 e 1988.

Per far entrare in vigore gli annessi in questo caso la IMO ha deciso che il numero minimo di nazioni aderenti doveva essere 15 con un minimo del 50% del tonnellaggio lordo mondiale.

La MARPOL 73/78 è ratificata in Italia con le leggi 462/80 e 438/82.

1.2.3 ANNESSO VI

Negli anni l'interesse globale è aumentato nei riguardi dell'inquinamento atmosferico in particolar modo agli effetti dovuti ai gas che portano alla riduzione dello strato dell'ozono, a quelli che portano al surriscaldamento globale ovvero i gas serra e quelli delle sostanze che causano il fenomeno delle piogge acide. La principale causa di quest'ultimo impatto ambientale è considerata l'emissione dei gas esausti a seguito della combustione di combustibili contenenti zolfo.

Secondo l'IMO la soluzione più efficace era di passare da dei combustibili con alto tenore di zolfo a dei combustibili più puliti, ovvero con un tenore di zolfo minore ad un valore massimo stabilito. Riducendo la presenza all'interno del combustibile si va a ridurre l'emissione di SO_x.

I benefici di un combustibile meno ricco di zolfo sono, escluse la riduzione sulle emissioni di SO_x, un più alto potere calorifico superiore (HHV), una diminuzione della formazione di fanghi ed una riduzione di corrosione di tubature e parti meccaniche che presentano una temperatura minore e portano a condensazione i gas esausti con formazione di goccioline di SO_x. Lo svantaggio che comporta è economico visto che il combustibile deve essere desolforizzato e questo è un processo costoso.

In quegli anni in cui iniziò un interesse circa l'inquinamento dell'aria, l'International Organization for Standardization (ISO) impose per il petrolio usato in ambito marino come combustibile un massimo tenore di zolfo del 5% [7].

Inizialmente si provò con proposte per una soluzione globale, queste però trovarono resistenza da parte dell'industria petrolifera, di quella navale e delle nazioni estrattrici di petrolio, così portando ad un approccio più locale.

Nel 1997 venne aggiunta alla MARPOL 73/78 un nuovo annesso sul tema di prevenzione dall'inquinamento dell'aria che entrò in vigore nel 2005. Il suo obiettivo era di minimizzare le emissioni limitando le principali fonti d'inquinamento atmosferico contenute all'interno dei gas esausti delle navi. Le principali sono gli SO_x, gli NO_x, sostanze dannose per lo strato dell'ozono (ODS) ed i composti organici volatili (VOC).

Nella prima versione l'annesso VI fissò come limite massimo del tenore di zolfo un valore del 4,5% nei combustibili per uso navale, mentre il limite per le aree speciali fu fissato all'1,5%. Questi valori negli anni subirono delle modifiche, a seguito di revisioni di The Marine Environment Protection Committee (MEPC), motivate dall'avanzamento tecnologico [8].

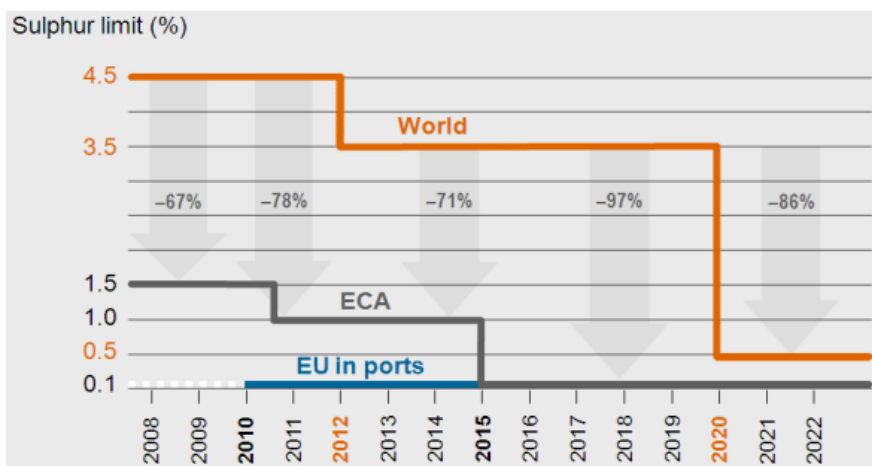


Figura 1.8 Andamento nel tempo dei limiti di tenore di zolfo [8]

Con la revisione del 2008 della MEPC ci fu pure l'introduzione del NO_x Technical Code.

Il Technical Code serve a controllare le emissioni degli NO_x e viene applicato solamente ai motori diesel con lo scopo di testarli, controllarli. Tali controlli servono ad assicurare delle emissioni minori dei limiti consentiti dalla voce 13 dell'annesso VI.

L'applicazione del Technical Code avviene solo per i motori diesel perché presentano delle temperature più elevate rispetto alle caldaie, condizione che favorisce maggiormente il formarsi degli NO_x termici.

I precursori degli NO_x, durante il processo di combustione, sono l'azoto e l'ossigeno, queste due molecole rappresentano il 99% dell'aria in ingresso. La produzione degli NO_x è funzione della temperatura adiabatica del fronte di fiamma e, se presente, della quantità di azoto presente nel combustibile. Inoltre è pure funzione dei tempi di esposizione alle alte temperature dei precursori.

I controlli sugli NO_x richiesti dall'annesso VI vengono applicati, in particolare, solo ai motori con una potenza superiore a 130 kW con eccezione dei motori di emergenza ed a quelli installati sulle scialuppe di salvataggio.

La tabella 1.2 suddivide le navi in 3 gruppi in funzione dell'intervallo temporale in cui è stato installato il motore diesel, in ognuno si trovano dei limiti sulle emissioni (g/kWh) a seconda del numero di giri n (rpm). A bassi valori di n si hanno dei limiti meno stringenti visto che i tempi che il combustibile risiede nella camera di combustione sono maggiori.

Come si nota dalla tabella 1.2, i valori di soglia sulle emissioni sono diminuiti, aggiornandosi a valori coerenti con l'avanzamento tecnologico.

Tier	Ship construction date on or after	Total weighted cycle emission limit (g/kWh) $n = \text{engine's rated speed (rpm)}$		
		$n < 130$	$n = 130 - 1999$	$n \geq 2000$
I	1 January 2000	17.0	$45 \cdot n^{(-0.2)}$ e.g., 720 rpm – 12.1	9.8
II	1 January 2011	14.4	$44 \cdot n^{(-0.23)}$ e.g., 720 rpm – 9.7	7.7
III	1 January 2016	3.4	$9 \cdot n^{(-0.2)}$ e.g., 720 rpm – 2.4	2.0

Tabella 1.2 limiti di emissione di NOX in funzione della costruzione e del numero di giri n [8]

L'annesso VI introdusse, come anticipato, un divieto sulle emissioni delle ODS. Per misurare l'impatto sullo strato dell'ozono di queste sostanze fu introdotto un valore normato, l'Ozone Depleting Potential (ODP). La definizione dell'ODP è:

$$ODP_i = \frac{\int_0^T m_{O_3/i} dt}{\int_0^T m_{O_3/CFCl_3} dt}$$

Con:

- $m_{O_3/i}$: la massa di ozono persa a causa del gas "i";
- T: intervallo di tempo.

Fra le sostanze con più alto valore ODP troviamo gli idrocarburi alogenati ed i clorofluorocarburi (CFC), infatti dal 19 maggio 2005 è stata vietata l'installazione sulle navi in costruzione di sistemi contenenti queste sostanze, che furono ampiamente usate in passato per esempio in sistemi refrigeranti ed antincendio.

Il loro sostituto è stato l'idroclorofluorocarburo (HCFC), che presenta valori di ODP più bassi di circa un ordine di grandezza, però viene anch'esso classificato come ODP. Pure gli HCFC dal 1° gennaio 2020 in poi non potranno più essere utilizzati in sistemi installati sulle navi in costruzione [8].

Le ultime sostanze di cui tratta l'annesso VI sono le VOC, ci sono due peculiarità nella regolamentazione delle VOC.

La prima è il controllo delle emissioni in atmosfera mediante l'utilizzo di sistemi di controllo. Uno stato può scegliere se applicare i controlli anche solamente in certi porti o terminal, però deve notificare all'IMO la lista completa così da poter adempiere al suo compito di divulgazione di essi. Lo stato oltre a scegliere le aree può inoltre scegliere se applicare i controlli a determinate dimensioni di navi.

Il secondo aspetto dei controlli delle VOC è che tutte le navi cisterne che trasportano olio greggio dispongano di un piano di gestione delle VOC [10].

L'incenerimento a bordo della nave è vietato, fatta esclusione all'interno dell'inceneritore.

L'anidride carbonica (CO₂) è ritenuta il maggior responsabile dell'effetto serra perciò l'IMO adottò delle misure obbligatorie, sia tecniche che operative di efficienza energetica, per ridurre le emissioni di CO₂. Queste misure di sicurezza sono due e hanno i seguenti nomi: Energy Efficiency Design Index (EEDI) e Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP).

L'EEDI è obbligatoria per le navi in costruzione, ha lo scopo di promuovere l'utilizzo di macchinari con un'efficienza più alta, perciò si può affermare che l'EEDI è una misura tecnica. Il SEEMP è obbligatorio per tutte le navi e consiste in una misura operativa che definisce un meccanismo per migliorare l'efficienza energetica delle navi in maniera efficace ed economica. Queste due misure di sicurezza vanno applicate alle navi di peso pari o superiore a 400 tonnellate.

L'EEDI richiede che le nuove navi abbiano un livello minimo di efficienza energetica per miglio di capacità, questo livello viene progressivamente aumentato ogni cinque anni, così da far in modo che le aziende investano costantemente denaro per il progresso tecnologico.

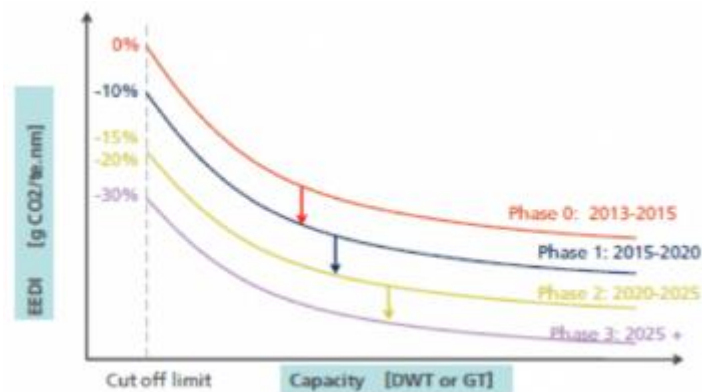


Figura 1.10 Funzioni di EEDI

L'EEDI viene rappresentato da una cifra specifica per ogni singola tipologia di nave, tale valore viene espresso in grammi di CO₂ per miglio di capacità della nave.

Il SEEMP consiste in una serie di accorgimenti tecnici e di ottimizzazioni, andando a ridurre gli sprechi. È composto da quattro fasi:

- Pianificazione;
- Implementazione;
- Monitoraggio;
- Autovalutazione e miglioramento.

1.2.4 AREE ECA

Oltre alle zone costiere standard di 50 miglia, si introdusse, o per meglio dire lo si riprese dalla OILPOL 54, il concetto di aree speciali tramite la MARPOL 73/78. Le aree ECA sono zone nelle quali ci sono dei controlli più stringenti, per minimizzare le emissioni in atmosfera. Rimandando alla figura 1.8, si possono vedere i limiti massimi di emissione consentiti per gli SO_x:

- Prima del 1° luglio 2010: 1,50%;
- Tra il 1° luglio 2010 ed il 1° gennaio 2015: 1,00%;
- Dopo il 1° gennaio 2015: 0,10%.

In principio le aree ECA prevedevano delle limitazioni solamente degli SO_x. Tali zone venivano anche indicate come Sulfur Emission Control Area (SECA), successivamente i limiti sulle emissioni vennero imposti pure sugli NO_x attraverso i limiti consentiti dal Tier III. Tali aree vengono denominate come Nitrogen Emission Control Area (NECA).

Attualmente le aree ECA sono:

- Mar Baltico (2005);
- Mare del Nord, Canale della Manica (2006);
- Nord America, Hawaii (2012);
- Porto Rico, Isole Vergine USA (2014).

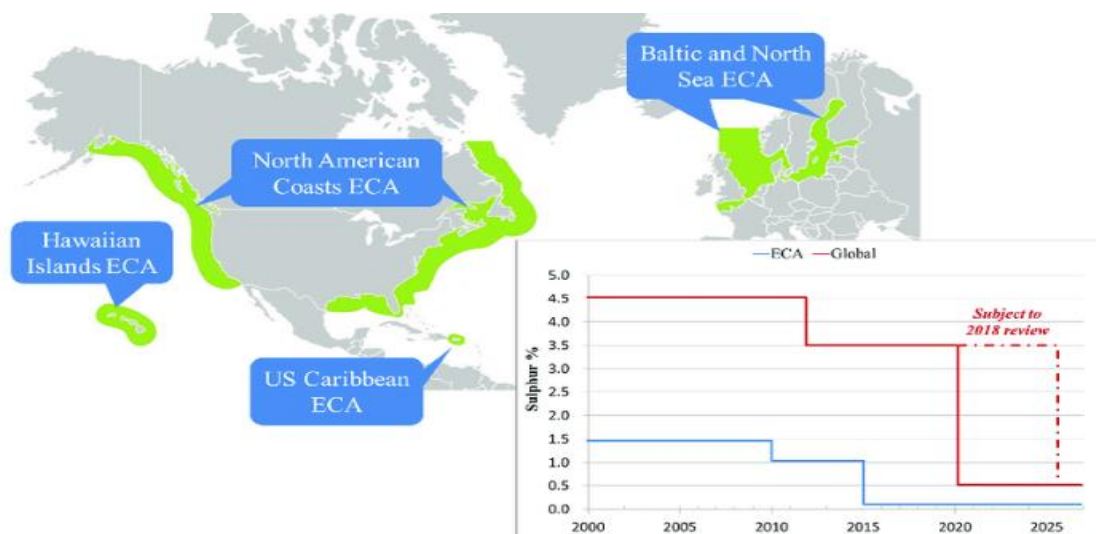


Figura 1.11 Mappa delle aree ECA [11]

In futuro si sta pensando di far diventare area ECA pure il Mar Mediterraneo, così come l'Alaska, il Messico, l'Australia ed altre aree della costa pacifica dell'Asia.

Per far parte delle aree ECA, i paesi che accettano l'annesso VI della MARPOL 73/78, possono far richiesta di designare delle determinate zone come aree ECA. Tale richiesta va presentata al MEPC motivando la necessità di questi limiti più stringenti, per esempio per la presenza di centri abitati o di salvaguardia di certi ecosistemi o per ragioni di ricerca.

1.3 COLD IRONING

A seguito dell'aumento del commercio globale si ebbe come conseguenza un incremento del commercio navale, questo portò ad una pressione per ridurre le emissioni in prossimità dei porti [12].

Le navi durante la navigazione trovano una resistenza al moto, quindi bisogna fornire una sufficiente forza per vincere questa resistenza. Storicamente questa forza veniva fornita dal lavoro umano mediante i remi, successivamente venne sostituito da quello del vento attraverso l'ausilio delle vele. Oggigiorno si usano le eliche propulsive messe in movimento dai motori.

Durante l'attracco delle navi in porto, la richiesta energetica legata al moto della nave viene a mancare. Nonostante ciò la domanda elettrica della nave non è nulla siccome ci potrebbero essere delle utenze elettriche, termiche e frigorifere con una quantità variabile in funzione del tipo di nave.

Nel periodo di stazionamento i motori propulsivi vengono perciò spenti, però resteranno in funzione dei motori ausiliari così da poter soddisfare le richieste energetiche della nave, seppur minori rispetto la navigazione. Gli attracchi delle navi possono essere più o meno frequenti in funzione del porto ed avere dei tempi di ormeggio molto vari anche in funzione del tipo di nave. La tipologia di nave ed ovviamente anche la sua dimensione influenzano la quantità di energia elettrica che dovrà essere fornita.

Ship Type	Differenza di potenziale [kV]	Potenza [MVA]
Cruise ships	6,6 o 11	16-20
Container ships	6,6	7,5
Liquified natural gas carriers	6,6 o 11	10,7
Ro-Ro ships	11	6,5
Tankers	6,6	7,1

Tabella 1.3 Valori tipici di potenza richiesta per tipologia di nave [13]

Alcuni porti per poter ridurre le emissioni derivanti da questi motori ausiliari, ma allo stesso tempo per non far mancare i fabbisogni energetici di essi, organizzarono una fornitura di energia elettrica dalla rete elettrica portuale, permettendo quindi lo spegnimento dei motori ausiliari. Questa tecnica trova molti nomi tra cui Alternative Maritime Power (AMP), Shore Power o On-Shore Power Supply però il più diffuso è cold ironing.

Il termine cold ironing ha origine da quando le navi dotate di generatore a vapore a bordo erano attraccate per riparazioni. Durante tale periodo tutte le tubazioni e la caldaia erano freddi, da lì il termine cold ironing.

La potenza richiesta dalle navi presenti nel porto può essere fornita non solo allacciandosi alla rete elettrica a terra ma pure da impianti di produzione di energia elettrica presenti nel porto. Questa seconda modalità è stata pensata per il fatto che generalmente nei porti si hanno reti elettriche antiquate e quindi non adatte al soddisfacimento di certe richieste. Per ridurre al minimo le emissioni in atmosfera di questi impianti si è pensato di sfruttare le fonti rinnovabili

(solare, moto ondoso, maree, eolico, celle a combustibile, ecc.), però per realizzare questa riduzione occorre prima fare uno studio di fattibilità ed installare, probabilmente, degli accumulatori di grandi dimensioni.

Il cold ironing sta trovando applicazione in diversi porti europei ed americani, per citarne alcuni: Long Beach (Los Angeles), Gothenburg (Svezia), Seattle (Washington) e Juneau (Alaska). Anche se ha iniziato ad essere usato solamente nell'ultimo ventennio in ambito commerciale, questa tecnica in realtà veniva utilizzata ben prima in ambito militare.

Benefici:

- La riduzione delle emissioni atmosferiche prodotte dalle navi ormeggiate in porto. Attraverso il cold ironing si riesce a soddisfare la richiesta energetica della nave, senza però avere emissioni di sostanze inquinanti derivanti dalla nave dovute dalla combustione. Questo beneficio lo si nota in particolar modo nei grossi porti presenti nei pressi di centri abitati;
- Un secondo beneficio, fortemente connesso al precedente, è la riduzione dei costi medici legati alla popolazione. Secondo una stima l'inquinamento dell'aria urbana è responsabile di 1,4% dei decessi prematuri. Inoltre, approssimativamente, il 3% delle morti in età adulta sono causate da malattie cardiovascolari o respiratorie mentre il 5% del cancro ai polmoni e trachee sono attribuiti ai PM [14];
- L'energia elettrica *on-shore* è soggetta a più restrittivi limiti sulle emissioni, così da ottenere, a parità di energia prodotta, una minore emissione in atmosfera;
- A seguito del parallelo tra la rete elettrica di bordo e quella terrestre i generatori ausiliari vengono arrestati, si ha perciò una riduzione dell'usura dei macchinari. Questo fa sì di aumentare la vita dei macchinari e così di poter ammortizzare il loro costo in un tempo maggiore;
- I costi legati alla manutenzione ed alla manodopera delle navi (legati alla parte di produzione di energia elettrica dai motori ausiliari) saranno ridotti;
- L'eliminazione dei rumori derivanti dalle parti in movimento dei motori ausiliari della nave, comportando una riduzione dell'inquinamento acustico.

Svantaggi:

- L'elettricità prodotta a bordo della nave risulta essere più economica rispetto a quella comprata dalla rete elettrica a terra. Questo è dovuto al fatto che l'elettricità a terra viene tassata, principalmente per compensare le perdite durante il trasporto e per coprire i costi di manutenzione della rete elettrica. Nel 2011 tuttavia l'Unione Europea permise alla Germania e alla Svezia di fornire elettricità da terra detassata così da incentivare il cold ironing [14];
- Si avrebbero elevati costi per poter fornire l'elettricità dalla rete elettrica nel caso in cui il porto utilizzasse il cold ironing. Le navi sono soggette ad un costo per poter utilizzare il cold ironing, che consiste in tutta l'apparecchiatura elettronica necessaria per il parallelo alla rete elettrica del porto. Questo investimento è variabile a seconda se la nave è già stata costruita o meno. Nel caso in cui si faccia un intervento a seguito della sua costruzione i

costi saranno maggiori, così da andare a restringere il numero delle navi che, a seguito di un'analisi costi-benefici, se lo potrebbero permettere. I porti invece hanno a loro carico tutte le spese per l'elettrificazione del terminal;

- L'uso di elettricità dalla rete elettrica terrestre potrebbe far aumentare le emissioni di CO₂ nel caso in cui l'elettricità venisse prodotta da carbone;
- L'uso del cold ironing può risultare difficoltoso durante la fase di parallelo fra la nave ed il porto con un possibile danno alle apparecchiature elettroniche di bordo;
- Il cold ironing è applicabile solo quando la nave è attraccata in porto. Durante la navigazione o le manovre all'interno del porto la nave può usare solamente i motori;
- La mancanza di uno standard per l'elettricità, sia a bordo che a terra, comporta una maggiore complessità durante la realizzazione dei sistemi di alimentazione. In particolare non c'è una compatibilità di voltaggio e frequenza. Questa poca omogeneità, durante la fase di analisi di costi-benefici, porta ad una difficoltà a fare un'analisi accurata siccome ogni nave ed ogni terminal sono unici.

1.3.1 ALLACCIAMENTO

Per l'allacciamento della nave, ovvero per ogni operazione di cold ironing, si hanno operazioni di sincronizzazione tra la nave e la rete elettrica portuale.

All'interno della zona portuale, a seconda delle navi che la frequentano, si potranno decidere varie configurazioni dell'impianto per l'allacciamento alla rete elettrica.

A titolo di esempio si riportano tre disposizioni possibili:

- **Distributed cold ironing topology:**
Ogni terminal possiede un convertitore di frequenze ed un trasformatore, in pratica ogni banchina ha un sistema completo. Questa configurazione da una maggiore flessibilità, ma comporta un altissimo costo complessivo.
Vedi figura 1.12.
- **Centralised cold ironing topology:**
Ha la peculiarità di non avere per ogni banchina un convertitore di frequenze, ma ne ha uno centralizzato. Tenendo conto della diversità dei carichi previsti dalle banchine e, siccome non tutte richiederanno la stessa quantità nello stesso momento, il convertitore potrà essere di taglia minore rispetto al totale del carico combinato.
Vedi figura 1.13.
- **DC distribution cold ironing:**
È un ibrido fra le due tipologie precedentemente descritte.
Vedi figura 1.14.

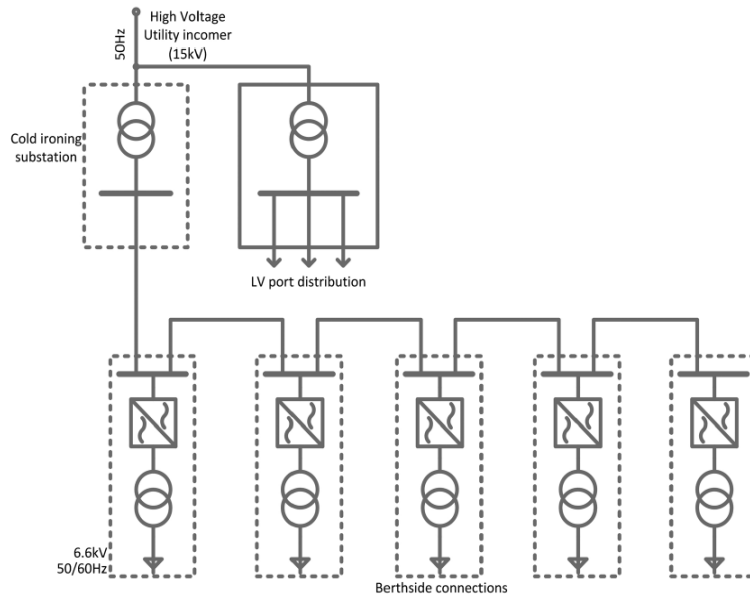


Figura 1.12 Distributed cold ironing topology [17]

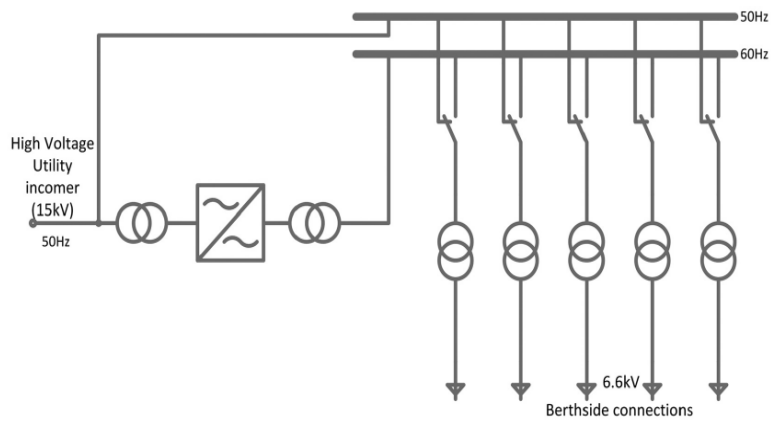


Figura 1.13 Centralised cold ironing topology [17]

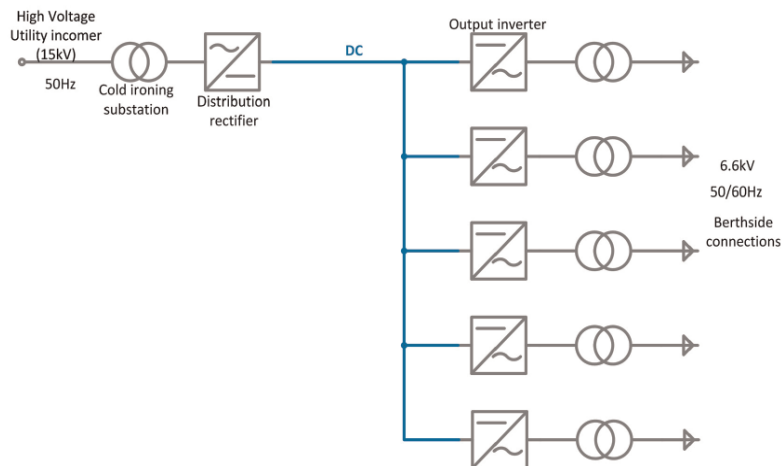


Figura 1.14 DC distribution cold ironing topology [17]

Le configurazioni possibili sono svariate, ma una configurazione generica la si vede in figura 1.15:

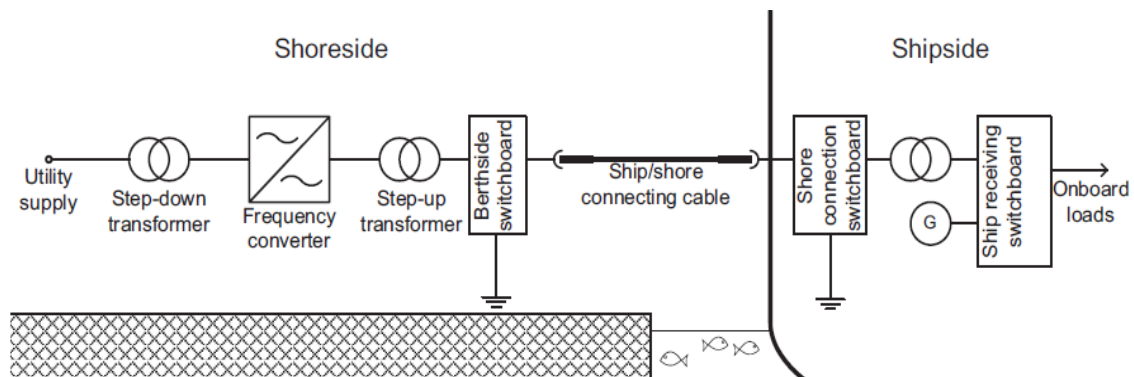


Figura 1.15 Generica connessione elettrica tra nave ormeggiata e rete nazionale [15]

La rete, come detto pocanzi, dovrà fornire un'adeguata potenza per soddisfare le richieste energetiche della nave attraccata. In questa fornitura risiede uno dei principali problemi, ovvero il bisogno di fornire l'elettricità a ben precisi valori. Per esempio un problema comune è quello della frequenza. Questo problema è particolarmente evidente nei porti europei ed asiatici, siccome tali aree distribuiscono l'elettricità ad una frequenza pari a 50 Hz mentre la maggior parte delle navi funziona con 60 Hz. Per ovviare a tale disomogeneità si richiede la presenza di un convertitore di frequenze (Frequency convertor in Fig 1.15).

Per affrontare il problema di eccessiva variabilità dei casi di allacciamento varie organizzazioni stanno lavorando da anni per sviluppare degli standard per l'implementazione della potenza fornita da terra. Attualmente IEC, ISO ed IEEE stanno lavorando sinergicamente per produrre uno standard unico [16].

Descrizione dei componenti in figura 1.15:

- Trasformatore AT/MT: serve per l'allacciamento alla rete elettrica nazionale, in genere in alta tensione (AT). Per AT si intende una tensione maggiore di 10 kV, mentre per media tensione (MT) ci si riferisce a una tensione che non supera tale valore limite;
- Convertitore di frequenza;
- Trasformatore secondario: serve per aumentare la tensione nel caso in cui fosse troppo bassa;
- Sono previsti due interruttori, uno a terra e uno sulla nave, per ragioni di sicurezza del personale a bordo. Gli interruttori interrompono la fornitura elettrica alla nave in caso di emergenza;
- Cavo di collegamento nave-banchina:
Consiste in una gru che serve a sollevare i cavi ed a depositarli sulla nave;
- Trasformatore interno alla nave: abbassa la tensione ulteriormente fino a 400 V.



Figura 1.16 cavo di collegamento nave-banchina

1.3.2 ESEMPI DI COLD IRONING

In vari porti si è già iniziato ad usare questa tecnica per ridurre le emissioni in atmosfera. Successivamente andremo a fare una panoramica dei porti principali che ad oggi utilizzano il cold ironing.

Nel 2001 a Juneau in Alaska per far fronte alle emissioni delle navi attraccate, che contribuivano durante il periodo estivo ad una riduzione della visibilità, la Princess Cruises iniziò ad applicare il cold ironing alle sue navi ormeggiate lì.

A seguito di questa prima applicazione di cold ironing seguirono delle successive, citandone alcune: Seattle, San Francisco, Boston, San Diego, Oakland e Tacoma, ma i due casi più rilevanti, a causa del loro traffico commerciale, sono Los Angeles e Long beach in California.

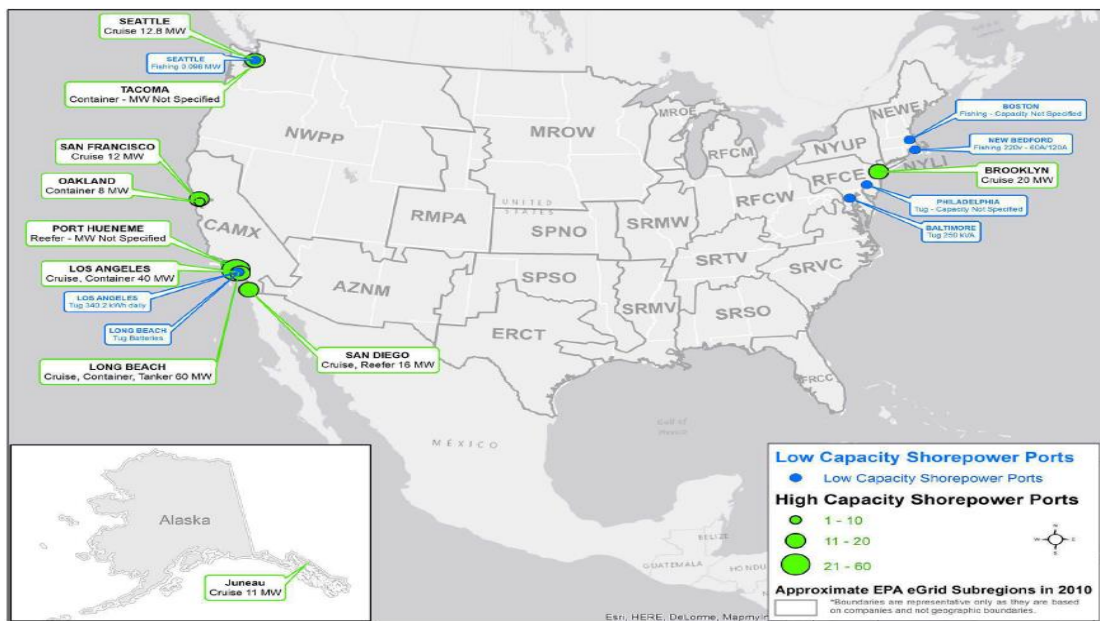


Figura 1.17 Mappa dei porti che usano il cold ironing nel Nord America [18]

Nel 2001 il sindaco Jonas Hahn decise di avviare una politica “No Net Increase” (NNI) che aveva come obiettivo di non far incrementare ulteriormente le emissioni. Questo fu dettato dal fatto che, secondo delle registrazioni dell’anno precedente, il porto aveva delle emissioni quotidiane di 33 tonnellate di NO_x, di cui 12,7 tonnellate riconducibili alle navi ormeggiate.

Una delle pratiche per contenere le emissioni era il cold ironing, noto allora come AMP. Si trattava di un progetto volontario. Le compagnie di navigazione stabilivano se utilizzare il cold ironing. Nel caso aderissero, come previsto da contratto, dovevano usare l’AMP per non meno di cinque anni.

Per incentivare questo programma il porto stanziò 810.000 \$ per coprire parzialmente i costi di installazione a bordo della nave.

Il porto di Los Angeles ha riassegnato nel 2004 il terminal della China Shipping per l’uso del cold ironing. Per l’utilizzo del terminal si richiedeva che almeno il 70% delle navi che vi attraccavano spegnessero i motori ausiliari per poi essere alimentate dalla rete elettrica. Due navi iniziarono ad utilizzarlo fin da subito, ma già nel 2005 se ne aggiunsero altre 13.

Il porto di Long Beach commissionò nel 2003 uno studio di fattibilità di una connessione elettrica con le navi. Vennero svolti degli studi su diverse tipologie di navi, in particolare su 12, delle quali solo 5 risultarono adatte per l’uso del cold ironing. La selezione delle tipologie di navi fu fatta tenendo conto del numero di attracchi e della loro durata.

In Europa il primo utilizzo del cold ironing fu a Gothenburg in Svezia, il progetto consisteva nella elettrificazione di una banchina ed iniziò con la collaborazione della Store Enso entrando in funzione nel 2000.

La fornitura di energia elettrica è alimentata parzialmente da un impianto eolico posto nel porto. Tale terminal si alternano sei navi durante l’arco della settimana. L’implementazione del cold ironing nel porto, fece sì che si avesse una riduzione di 80 tonnellate di NO_x e di 60 tonnellate di SO_x.

Altri porti che utilizzano il cold ironing in Europa sono Lübeck, Zeebrugge e Oulu.

Fra i porti che stanno pianificando di applicare il cold ironing abbiamo Barcellona, Bremen, Marsiglia, Civitavecchia, Rotterdam.



Figura 1.18 Mappa del Mar Baltico con contrassegnati i porti che usano il cold ironing [19]

Nel panorama italiano il cold ironing è abbastanza indietro rispetto al Nord Europa ed al Nord America. È una tecnologia ancora poco diffusa, al contrario delle previsioni fatte in un report dell'ISPRA del 2016 [20]. In quel periodo si iniziarono varie valutazioni per l'elettificazione di terminal su svariati porti italiani, tra i più grandi: Venezia, Civitavecchia, Taranto, La Spezia e Livorno.

A Venezia iniziò un progetto nel 2011 che successivamente venne abbandonato nel 2017. Savona sta valutando l'elettificazione di un numero ancora non definito di banchine per usare il cold ironing nel periodo di ormeggio di navi da crociera nel loro porto.

Genova invece è già dotato di banchine elettrificate, ciò nonostante si sono fatti ulteriori investimenti per lavorare ad un ampliamento dei terminal elettrificati per il cold ironing.

1.3.3 ANALISI COSTI-BENEFICI

L'analisi costi benefici è un metodo per considerare tutti i costi e benefici, sia monetari che non monetari, inerenti all'intera vita del progetto. Questo tipo di analisi permette a coloro che stanno valutando di cambiare la tecnologia in uso a favore di una diversa, di prendere una decisione confrontando tutti i pro e i contro così da avere una più chiara ed ampia visione su tutto ciò che comporterebbe l'avvio del nuovo progetto.

Un'analisi costi-benefici tipicamente comporta:

- l'identificazione di una serie di alternative per affrontare un problema aziendale o politico;
- la quantificazione e la monetizzazione del flusso di costi previsto ed i benefici di ogni alternativa nel corso della sua vita;
- la stima del Valore Attuale Netto (VAN) di ciascuna alternativa. Il VAN rappresenta il costo opportunità dei costi e benefici futuri.

La metodologia per affrontare un'analisi costi-benefici nel caso del cold ironing si basa sui calcoli di:

- Assorbimenti energetici:
A seconda del *case-study*, si devono analizzare in principio le navi che più frequentemente visitano il bacino portuale, andando a rilevare per ciascuna tipologia di nave le loro tensioni, frequenze, potenze medie e quelle di picco. Bisognerà tener conto successivamente dei tempi di stazionamento per anno di ciascuna tipologia.
- Calcolo dei fattori di emissione dei motori ausiliari:
Vengono valutate le emissioni in g/kWh dei principali inquinanti atmosferici. Questi valori dipenderanno dal rendimento del motore ausiliario e dal tipo e dalla purezza del combustibile.
- Calcolo delle emissioni derivanti dalla produzione elettrica:
Vengono valutate le fonti di produzione dell'energia elettrica (Si veda la fig.1.1), conoscendo con che percentuale incidono sulla produzione totale di energia e le emissioni di ciascuna fonte energetica, si possono stimare le emissioni dovute alla produzione di energia elettrica *on-shore*.
- Calcolo delle emissioni da fonti energetiche alternative:
Dato che l'elettricità può essere fornita anche solo parzialmente rispetto la richiesta totale, tali fonti verrebbero installate in prossimità del porto, come succede a Gothenburg. Bisogna considerare che quella quantità di energia elettrica non sarà soggetta alle emissioni della voce precedente ma ad emissioni inferiori di una quantità che è in funzione della fonte rinnovabile usata.
- Calcolo dell'abbattimento delle emissioni mediante l'uso del cold ironing;
- Costi da inquinamento acustico:
Le principali sorgenti di inquinamento acustico nelle zone limitrofe al porto sono dovute ai motori, ai gruppi elettrogeni delle navi all'ormeggio e dallo spostamento dei container. Andando a misurare i decibel di queste zone urbane maggiormente esposte, si vede che alterano la rumorosità di fondo, soprattutto durante le ore notturne;
- Costi di investimento:
I costi relativi all'alimentazione in AT variano in funzione della necessità o meno di cabine per la trasformazione. Gli investimenti necessari per il porto sono: spese legate alla fornitura di energia elettrica, spese inerenti ai trasformatori, *switchboard* e pannello di controllo, spese di cavi sotterranei e canalizzazioni ed eventualmente spese di convertitori di frequenza. Gli investimenti necessari della nave sono: sul sistema elettrico di distribuzione, sullo *switchboard* e sul pannello di controllo, sul sistema di avvolgicavo ed eventualmente, se non presente sulla banchina, di un trasformatore;
- Costi operativi.

Il costo di trasporto di energia elettrica da una rete locale fino ad una banchina può variare tra 300.000 e 4 milioni di dollari per ciascun ormeggio, tale variabilità è in funzione di dove è situato il porto, della richiesta di potenza, della tensione, della frequenza e della tipologia di nave.

I costi per le modifiche necessarie della nave hanno anch'essi delle oscillazioni in funzione della tipologia d'imbarcazione, della dimensione e della necessità di installazione del trasformatore. I costi possono essere compresi tra 300.000 e 1-2 milioni di dollari [21].

In tabella 1.4 si mostra il beneficio totale annuo del costo sanitario se il 60% di tutte le navi da crociera nel porto di Copenhagen usassero il cold ironing [14]:

Vessels	SO ₂	NO _x	PM	CO ₂	Energy demand (MWh/season)
<i>No facility for shore power. All vessels use AE-generated power (0.1 sulphur MGO)</i>					
Vessels using AE power	€ 73,166.25	€ 4,569,754,741	€ 332,573.85	€ 408,590.73	€31,674
<i>60% vessels adapted to shore power (based on Nordic energy mix). All the other use AE-generated power (0.1 sulphur MGO)</i>					
Vessels using shore power	€ 15,365	€ 66,469	€ 19,954	€ 161,916	€ 19,004
Vessels using AE power	€ 29,266	€ 1,827,902	€ 133,030	€ 163,436	€ 19,669
Total	€ 44,631	€ 1,894,371	€ 152,984	€ 325,352	€ 31,674
Difference	€ 28,535	€ 2,675,384	€ 179,590	€ 83,238	
Percentage	48%	96%	85%	1%	
Total external saving cost using cold ironing				€ 2,833,508	
Total external saving cost using cold ironing (including CO ₂)				€ 2,966,747	

Tabella 1.4 analisi costi-benefici nel porto di Copenhagen

L'analisi costi-benefici ha però varie critiche, una è che i benefici sono spesso difficili da quantificare e non possono essere ricondotti ad un valore monetario. Una seconda critica è che è difficile da stimare a causa di incertezze.

1.4 EMISSIONI DEI MOTORI AD ACCENSIONE SPONTANEA

I motori ad accensione spontanea, ovvero i motori diesel, si basano sul ciclo illustrato in figura 1.19. Il ciclo parte dal punto C, l'aria viene compressa adiabaticamente fino al punto D, successivamente il calore viene inserito sia a volume costante che a pressione costante. In seguito da E avviene un'espansione adiabatica fino al punto F ed infine il calore residuo viene scaricato a volume costante attraverso i gas esausti.

L'efficienza di questo ciclo si aggira attorno al 55-60%, questo implica che la restante parte viene persa con i gas di scarico emessi.

Al giorno d'oggi il calore di scarico non viene totalmente perso, ma è pratica comune recuperarlo il più possibile prima dell'emissione dei gas esausti in atmosfera, così da minimizzare gli sprechi.

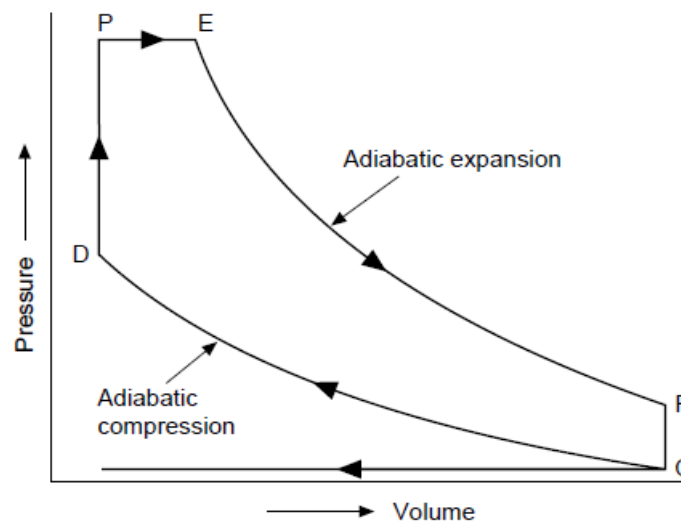


Figura 1.19 Ciclo Sabathé

I gas esausti emessi dai motori diesel comprendono: azoto, ossigeno, anidride carbonica, vapore acqueo, ossidi di azoto, ossidi di zolfo, particolato atmosferico (PM), idrocarburi incombusti (HC), monossido di carbonio (CO).

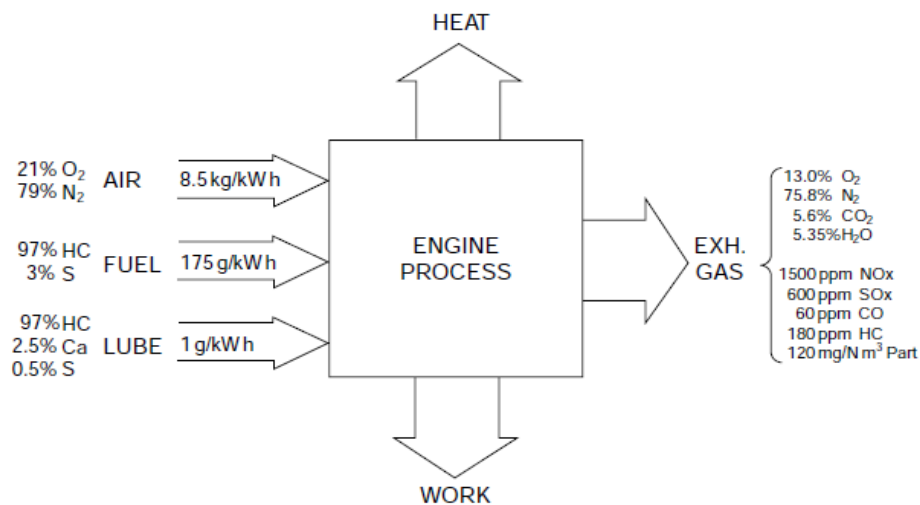


Figura 1.20 Tipiche emissioni da motore diesel [22]

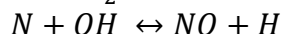
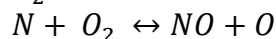
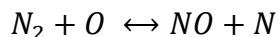
Analizzando solamente la parte delle emissioni considerate come specie chimiche inquinanti:

- **NO_x:**

In questo gruppo i due elementi che vengono principalmente emessi sono il monossido di azoto (NO) ed il diossido di azoto (NO₂). L'NO può avere quattro differenti origini:

- NO termici:

Il meccanismo di formazione è quello di Zeldovich, che motiva la formazione del NO a causa della presenza dell'ossigeno e dell'azoto molecolare che reagiscono secondo le seguenti reazioni:



Solamente ad alte temperature ($T > 1800 \text{ K}$) la velocità di queste reazioni assume un'importanza rilevante, infatti esse avvengono in zona di combustione.

- NO prompt:

Il meccanismo di formazione è quello di Fenimore, introdotto per motivare la presenza di NO pure a temperature non elevate.

I reagenti di tale meccanismo sono l'azoto molecolare ed i radicali degli idrocarburi.

Il meccanismo di Fenimore è fortemente connesso al fronte di fiamma, ovvero nella zona dove si ha un gradiente di temperatura elevato a causa della combustione.

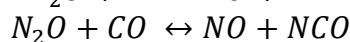
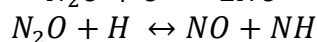
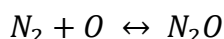
- NO da combustibile:

L'NO viene prodotto dall'azoto presente originariamente nel combustibile.

L'unica soluzione per prevenire la formazione da questa origine è la denitrificazione.

- NO da protossido di azoto (N₂O):

Il meccanismo di formazione è stato sviluppato da Wolfrum e Bowman e si basa sulle seguenti reazioni:



L'NO₂ si forma dal NO in una fase successiva all'emissione in atmosfera dei gas esausti.

Gli effetti degli NO_x sono prevalentemente ambientali e comprendono lo smog fotochimico, il fenomeno delle piogge acide e la distruzione dello strato di ozono.

- **SO_x:**

La formazione di questi ossidi è causata unicamente dalla presenza, alquanto comune nei combustibili fossili, di zolfo.

Lo zolfo presente si ossida durante la combustione andando a formare principalmente il diossido di zolfo (SO₂) ed il triossido di zolfo (SO₃).

Dato che le emissioni di SO_x sono connesse solamente al tenore di zolfo all'interno del combustibile, per poterle ridurre bisogna usare dei combustibili a basso tenore di zolfo.

I problemi legati agli SO_x sono ambientali (contribuendo al fenomeno delle piogge acide), impiantistici (corrodendo le parti a contatto con i gas esausti) e alla salute dell'uomo.

- PM:

Il particolato atmosferico può essere suddiviso in funzione della loro composizione chimica in due famiglie: quella di particolato carbonioso e quella di particolato non carbonioso. Può essere classificato inoltre a seconda della sua origine in primario, se emesso direttamente attraverso i gas esausti e secondario, se si forma in atmosfera a causa delle emissioni.

Generalmente gli si associa pure un valore corrisponde al diametro massimo in μm delle particelle (PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$, $\text{PM}_{0,1}$).

Nel caso dei motori ad accensione spontanea viene prodotto in maniera rilevante il particolato carbonioso causato dalle elevate temperature in gioco ed alla disomogeneità della combustione.

Il PM può essere originato nei motori diesel da:

- Agglomerazione di molte piccole particelle;
- Combustione parziale di olio lubrificante;
- Solfati ed acqua.

Il particolato ha degli impatti in funzione alla sua grandezza, quello più piccolo è più pericoloso siccome rimane sospeso in aria per maggior tempo e, se respirato, penetra fino agli alveoli polmonari. Ha una diretta connessione con problemi di allergia, asma ed altri danni alla salute dell'essere umano.

- HC

Gli idrocarburi incombusti vengono creati dalla combustione parziale dovuti soprattutto ai fenomeni di quenching presenti nei punti periferici, dove il rapporto d'equivalenza assume dei valori al di fuori dell'intervallo di infiammabilità od a causa dei tempi di permanenza in camera di combustione troppo brevi.

È da notare che gli incombusti costituiscono un problema marginale nel caso dei motori diesel siccome generalmente operano con forti eccessi d'aria.

- CO

Il monossido di carbonio è il risultato di una combustione incompleta del carbonio. Le cause che l'originano sono le medesime di quelle precedentemente elencate per gli HC ed anch'essi presentano un problema trascurabile per i motori diesel.

1.4.1 METODI DI ABBATTIMENTO DEGLI NO_x

Per rispettare i limiti imposti sulle emissioni (Vedi tabella 1.2), si adottano diversi accorgimenti.

I componenti critici per l'emissione di NO_x possono essere riassunti in:

- Camera di combustione;
- Sistema di sovralimentazione dell'aria;
- Sistema di iniezione.

Le diverse opzioni per l'abbattimento delle emissioni si possono catalogare in tre famiglie:

- Uso di combustibili alternativi;
- Progettazione accurata del motore;
- Sistemi di post-trattamento.

Un'adeguata progettazione fa sì che la formazione degli NO_x in camera di combustione venga ridotta, questo è possibile agendo tramite vari parametri, i quali però giocano pure un ruolo primario sull'efficienza della combustione. Essi sono [23]:

- Velocità di rotazione;
- Potenza erogata dal motore;
- Rapporto volumetrico di compressione;
- Parametri caratteristici dell'iniezione;
- Geometria dei condotti di aspirazione e della camera di combustione;
- L'adozione della sovralimentazione per incrementare la massa d'aria introdotta nel cilindro;
- L'anticipo all'iniezione;
- Fasatura delle valvole;
- Pressione, temperatura e composizione della carica all'aspirazione.

A seguito di una buona progettazione il livello delle emissioni può essere ridotto del 30-60%. Le misure che si possono adottare internamente al motore, escludendo la variazione dei parametri precedentemente elencati, sono:

- L'inserimento di acqua in camera di combustione:
L'acqua può venire mescolata opportunamente con il combustibile ed essere introdotta attraverso l'iniettore oppure direttamente in zona di combustione tramite l'ausilio di un ugello unicamente dedicato. Questa seconda opzione risulta essere meno efficace per l'abbattimento ottimale degli NO_x a causa di una non eccellente miscelazione. Si possono ottenere delle riduzioni delle emissioni del 50-60% senza compromettere la potenza o la vita di componenti del motore.
- Il ricircolo dei gas di scarico:
Consiste in una modifica dell'aria in ingresso andando a far ricircolare parte dei gas esausti. La quota del gas destinata al ricircolo viene raffreddata e pulita prima di venir reintrodotta.
Questo processo contribuisce in parte riducendo la concentrazione dell'ossigeno introdotto in zona di combustione ed in parte introducendo H₂O e CO₂.
Il ricircolo dei gas esausti permette ad una riduzione delle emissioni del 50-60% senza intaccare la potenza prodotta.

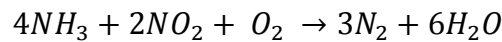
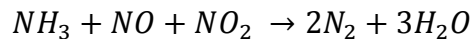
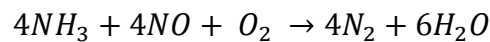
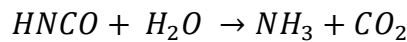
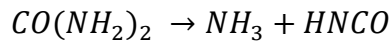
Lo scopo principale di queste misure è di abbassare i picchi di temperatura.

I metodi finora citati non sono sufficienti per rientrare nelle soglie imposte dalle normative vigenti, perciò si usano delle tecniche post-trattamento che agendo sui fumi sono capaci di ridurre le emissioni oltre il 95%.

Il sistema di post-trattamento maggiormente usato è il sistema Selective Catalytic Reduction (SCR). L'SCR si basa sulla reazione fra gli NO_x e l'ammoniaca (NH₃), anche se, non si tende ad avere direttamente NH₃, ma di ottenerla dalla urea (CO(NH₂)₂). Questo avviene siccome l'urea viene classificata come non pericolosa e non infiammabile al contrario del NH₃.

L'NH₃ viene mescolato con i gas esausti entro un intervallo di temperatura di 290 °C e 450°C. Il limite inferiore dell'intervallo di temperatura è dovuto al fatto che a temperature al di sotto di 270°C l'NH₃ reagirebbe con i solfuri formando il solfato di ammonio ((NH₄)₂SO₄), invece il limite superiore dell'intervallo di temperatura è fissato a 450°C per evitare che il catalizzatore degradi.

Le reazioni principali del sistema di post-trattamento SCR sono:



Il sistema SCR permette di ottenere delle riduzioni oltre il 90%.

1.4.2 METODI DI ABBATTIMENTO DEGLI SO_x

Come anticipato, l'unica metodologia per la riduzione delle emissioni degli SO_x, è la diminuzione del tenore di zolfo all'interno del combustibile. Essendo il tenore dello zolfo inferiore farà sì che si abbia una minore formazione di SO_x. Per ottenere tale riduzione del tenore di zolfo si utilizza la desolforazione.

In generale, però, è possibile contenere le emissioni degli SO_x tramite tre metodologie:

- Desolforazione del combustibile;
- Scelta del combustibile;
- Desolforazione dei gas esausti.

I tre metodi agiscono temporalmente in maniere differenti, rispettivamente prima, durante e dopo la combustione.

La scelta della desolforazione dei gas esausti permette l'utilizzo di combustibili ad alto tenore di zolfo. Questa famiglia di combustibili risulta essere, durante la fase operativa, economicamente vantaggiosa siccome non soggetta ai costi di trattamento della desolforazione del combustibile. L'altra faccia della medaglia è che questi combustibili per poter essere utilizzati necessitano di un investimento iniziale elevato legato agli impianti di post-trattamento.

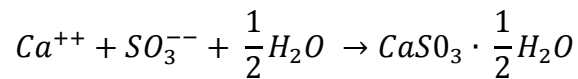
La desolfurazione dei fumi può essere fatta con tre tipologie:

- Dry process;
- Semi-Dry process;
- Wet process.

Il dry process corrisponde ad un adsorbimento fisico, ottenuto aggiungendo un additivo polverulento, generalmente a base di calcio o di magnesio. L'introduzione può avvenire in vari punti, però la più comune è quella fra il motore ed i filtri. Gli ossidi di zolfo reagiranno con l'additivo e formeranno dei solfati allo stato solido in forma di polvere secca che potrà essere facilmente rimossa.

Si ha una rimozione del 95% e rappresenta l'alternativa principale al wet scrubber soprattutto nel caso di piccole taglie perché ha un costo minore di costruzione legato al fatto che ha un minor numero di componenti.

La reazione alla base del dry scrubber, che utilizza come additivo l'idrossido di calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), è:



Il wet scrubber è il metodo più ampiamente usato e permette un abbattimento oltre il 95%. L'additivo che viene aggiunto è lo slurry (70% H_2O ; 30% CaCO_3) che viene nebulizzato ed inserito in controcorrente ai fumi. Il wet scrubber può essere suddiviso in tre processi a seconda del tipo di additivo:

- Assorbente alcalino;
- Assorbente alcalino terroso;
- Altri.

Oppure in altri tre processi a seconda della tipologia di ciclo:

- Sea water scrubber (ciclo aperto);
- Scrubber a ciclo chiuso;
- Scrubber ibrido.

1.4.3 METODI DI ABBATTIMENTO DEL PARTICOLATO ATMOSFERICO

L'abbattimento delle emissioni di particolato si può ottenere attraverso tre metodi:

- Miglioramento della tipologia di combustibile ed olio lubrificante usato:
C'è una chiara relazione fra il livello di particolato prodotto ed il tipo di combustibile usato, l'heavy fuel oil genera un maggior volume di particolato rispetto l'utilizzo di combustibili più puliti, come il marine diesel ed il marine gas oils;
- Miglioramento del processo di combustione;
- Utilizzo di sistemi di abbattimento:
 - Filtri o trappole antiparticolato;
 - Precipitatore elettrostatico;
 - Scrubber;
 - Filtri a maniche e cicloni.

I filtri antiparticolato sono parti metalliche o ceramiche formati da un materiale poroso dove, nelle sue cavità, verrà trattenuto il particolato. I filtri vengono aggiunti al condotto di scarico. Durante il filtraggio si ha un accumulo del particolato, comportando delle perdite di carico a causa delle ostruzioni. Per evitare che le perdite di carico aumentino troppo il filtro va rigenerato in modo continuo o periodicamente.

Il precipitatore elettrostatico consiste in delle piastre caricate positivamente affiancate a due a due con in mezzo un elettrodo caricato negativamente. Fra di loro transiteranno i gas esausti, mentre contemporaneamente l'elettrodo negativo emetterà elettroni. Questi ultimi andranno a depositarsi sulle particelle dei gas esausti, caricandole negativamente. Adesso presentando una carica verranno attratte e si depositeranno sulle piastre. Le piastre dovranno essere ripulite per poter mantenere alta l'efficacia del processo.

Le trappole ed i catalizzatori vengono ampiamente usati per l'abbattimento del particolato nei motori dei camion, sono però incompatibili con i combustibili usati in ambito marino a causa della presenza di alte concentrazioni di zolfo e di ceneri. La precipitazione elettrostatica è un metodo che potrebbe essere utilizzato in ambito marino però a causa della sua taglia trova difficilmente applicazione. Il metodo in cui si ripongono maggior aspettative sono gli scrubber.

CAPITOLO 2

MOTORI NAVALI

Un corpo immerso in un fluido è soggetto ad una forza che si oppone al suo moto. Per mantenere un corpo ad una velocità costante bisogna produrre una forza pari alla resistenza del fluido in cui è immerso.

I dispositivi che sono capaci di produrre tale forza, detta spinta, vengono chiamati propulsori. I propulsori perciò sono gli impianti che si occupano della conversione dell'energia meccanica nell'energia cinetica del vascello.

2.1 STORIA DEI PROPULSORI

Agli albori della navigazione, per vincere la resistenza fornita dalla massa d'acqua si usavano la forza fornita dall'uomo attraverso l'ausilio di remi oppure la forza fornita dal vento e sfruttata tramite le vele.

I primi propulsori ad essere ampiamente usati furono le ruote a pale. Esse venivano posizionate nella poppa della nave (Figura 2.1) oppure lateralmente (Figura 2.2). Il suo funzionamento si basa sulla pala che trasmette una differenza di quantità di moto all'acqua circostante alla nave, così fornendo alla nave stessa una spinta. Questi due tipi di propulsori erano caratterizzati da un rendimento elevato, però avevano una serie di inconvenienti, tra cui: variabilità dell'immersione della ruota a pale a seconda della condizione di carico; prestazioni ridotte in condizioni di mare mosso; incapacità della nave di mantenere una rotta stabile; bassa velocità di rotazione.

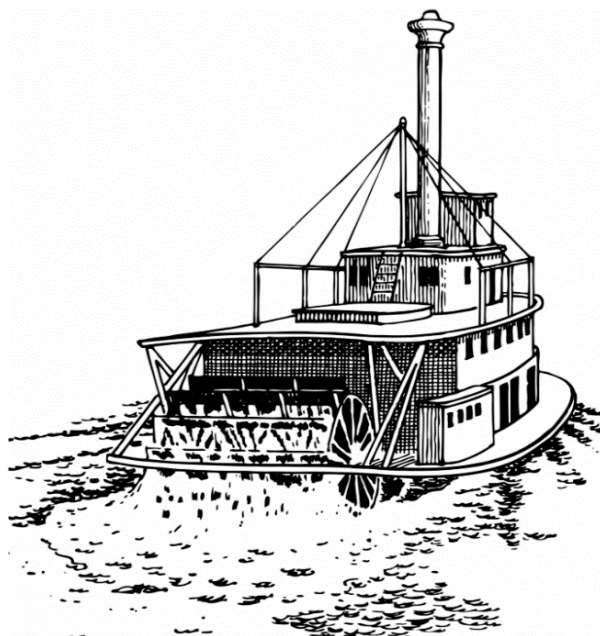


Figura 2.1 Ruota a pale posizionata a poppa

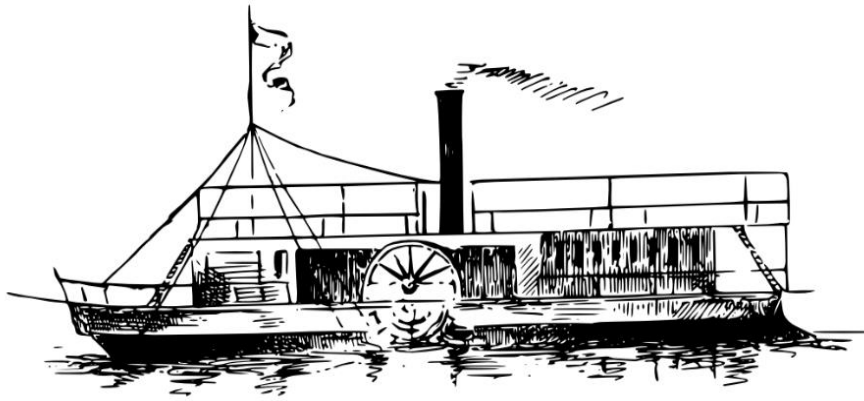


Figura 2.2 Ruota di pale posizionata lateralmente

All'inizio del XIX secolo cominciarono ad apparire i propulsori ad elica usati per trasformare la potenza meccanica dell'albero in una variazione di quantità di moto del fluido. I vantaggi dell'elica rispetto alla ruota a pale sono:

- una minore sensibilità alla differenza di immersione della nave;
- il suo posizionamento a poppa la protegge da danni e/o collisioni;
- ha un ingombro minore;
- può ruotare a velocità medio-basse garantendo un buon rendimento e permettendo l'uso di macchine marine più leggere e meno ingombranti;
- poco sensibile all'azione del mare mosso;
- consente una migliore governabilità della nave.

Alcune variazioni dell'elica furono pensate in seguito alla sua applicazione come propulsore, una di particolar nota è l'elica intubata, vedi figura 2.3, che consiste in un mantello che circonda l'elica, la sua presenza garantisce una spinta maggiore a parità di energia fornita.

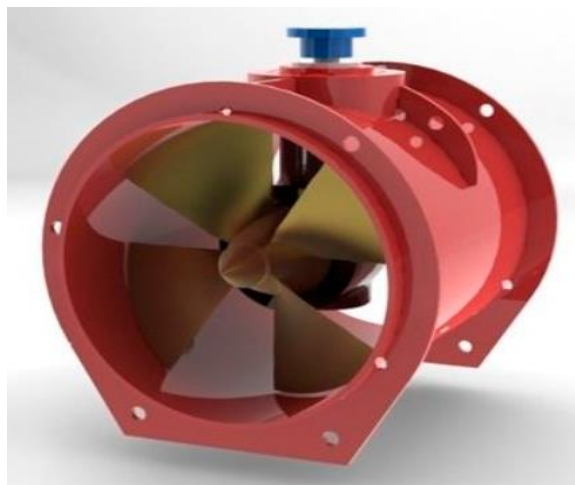


Figura 2.3 Elica intubata

Le eliche sono ancora ad oggi il propulsore marino più comunemente usato, l'unica alternativa è il propulsore a getto (idrogetto). Storicamente quest'ultimo viene considerato il più antico propulsore meccanico, venne brevettato in Inghilterra nel 1661 da Toodgood e Hayes [26].

2.2 PROGETTAZIONE DEI PROPULSORI

A seguito di studi svolti nella seconda metà del XIX secolo si osservò che la potenza richiesta per il moto della nave era direttamente connessa alla resistenza che la nave doveva superare per raggiungere la velocità desiderata.

È noto oggi che la resistenza è dipendente dalla geometria del corpo, dalla cinematica del moto, dal sistema delle forze esterne e dalle caratteristiche del fluido. La resistenza totale viene determinata dalla somma di tre contributi che rappresentano tre diverse resistenze [27].

$$R = R_f + R_w + R_a$$

Con:

- R_f : Resistenza viscosa;
- R_w : Resistenza d'onda;
- R_a : Resistenza aerodinamica.

Una volta determinata la resistenza a cui è soggetta l'imbarcazione si deve determinare la potenza effettiva necessaria per garantire l'avanzamento ad una certa velocità V .

$$N_{eff} = S V$$

S è la spinta e dovrà essere uguale alla resistenza R .

Ora, considerando che il propulsore dell'imbarcazione sia un'elica, si deve calcolare la potenza di spinta fornita dall'elica stessa, questa sarà superiore della N_{eff} e bisognerà tener conto del rendimento di carena η_{car} .

$$N_{sp} = N_{eff} \eta_{car}$$

2.3 MACCHINE MARINE

Le macchine marine sono i sistemi che si utilizzano per azionare i propulsori, ovvero consistono negli impianti che compiono la conversione dell'energia chimica del combustibile in energia termica per poi essere ulteriormente convertita in lavoro meccanico.

I motori possono essere classificati in due classi principali [28]:

- Motori convenzionali: sono quelli dove avviene la combustione;
- Motori non convenzionali: sono gli impianti che ricavano lavoro meccanico dell'albero senza che avvenga una combustione, ovvero fonti di energia non proveniente da combustibili fossili.

Gli apparati motore convenzionali si scindono in tre sottogruppi:

- Apparati motore esotermici: sono i tipi di motore in cui il fluido motore non partecipa alla combustione, ovvero che acquisisce il calore dalla combustione senza parteciparvi;
- Apparati motore endotermici: sono i tipi di motore dove il fluido motore partecipa alla combustione;
- Apparati motore misti: sono una combinazione delle due tipologie precedentemente elencate.

Negli anni vennero utilizzati svariate tipologie di macchine marine, e ad oggi si sta lavorando per sfruttarne delle nuove. Alcuni dei motori marini più usati oggi sono:

- Macchine alternative (apparato motore convenzionale endotermico);
- Turbina a vapore (apparato motore convenzionale esotermico);
- Turbina a gas (apparato motore convenzionale endotermico);
- Motore diesel (apparato motore convenzionale endotermico);
- Motore elettrico (apparato motore non convenzionale);
- Sistemi combinati.

Fra tutte le macchine marine quella più utilizzata è però il motore diesel.

La macchina alternativa fu il pioniere della propulsione meccanica, i suoi punti di forza erano un'elevata flessibilità in tante condizioni di carico, la facilità di invertire il verso di rotazione ed un numero di giri relativamente basso. Però portava con sé delle limitazioni tra cui il peso ed un ingombro elevati, una bassa potenza unitaria per cilindro e un elevato consumo specifico del combustibile.

La turbina a vapore fu usata per la prima volta nel 1894 da Parsons, essa produceva un movimento di rotazione diretto, al contrario della macchina alternativa. La turbina a vapore può raggiungere elevati valori di potenza con un consumo specifico economicamente accettabile, inoltre produce meno vibrazioni rispetto alla macchina marina precedentemente vista. La turbina a vapore porta anch'essa con sé una serie di inconvenienti, tra cui:

- Non è reversibile, perciò si ha bisogno di installare una seconda turbina con verso di rotazione opposto. Questa turbina viene chiamata turbina di marcia indietro. La turbina di marcia indietro ha lo scopo di produrre una spinta propulsiva per le manovre in retromarcia;
- Presenta una velocità di rotazione elevata, implicando il bisogno di un riduttore di velocità, ovvero un insieme di ingranaggi che però comportano una perdita di energia.

La turbina a gas è stata tra i motori termici l'ultimo, temporalmente parlando, ad entrare nel settore navale. Ha le peculiarità di sviluppare elevate potenze con pesi ed ingombri ridotti, di una rapidità di avviamento e di una variazione di potenza. Queste caratteristiche han fatto sì che assumesse un ruolo predominante nel settore militare però, a causa del suo maggior svantaggio, ovvero del suo elevato costo, non ha avuto lo stesso successo nel settore mercantile. Un ulteriore vantaggio, già introdotto nel capitolo precedente, è che emette una minore quantità di sostanze inquinanti.

La turbina a gas si differenzia in due tipologie, quella di derivazione industriale (heavy duty) e quella di derivazione aeronautica.

I motori diesel sono la macchina marina più utilizzata in campo navale e fin dalla loro invenzione nel 1892 hanno visto una continua crescita nell'utilizzo.

Fra i vantaggi presenti nei motori diesel c'è la reversibilità, l'affidabilità, l'economicità nella manutenzione, il poco ingombro impiantistico, un grande intervallo di potenze ed un consumo specifico inferiore alle altre macchine marine.

A seconda della velocità di rotazione n possiamo raggruppare i motori diesel in quattro gruppi, vedi tabella 1.2. I motori superveloci, veloci e la maggior parte di quelli semi-veloci devono essere accoppiati ad un riduttore ad ingranaggi siccome presentano un numero di giri non compatibile con la velocità di rotazione dell'albero. L'impossibilità di calettamento del propulsore direttamente all'albero è dovuto alle velocità troppo elevate che comporterebbero problemi di cavitazione.

Motore	n (giri/minuto)	
Superveloci	3000 - 4000	
Veloce	1000 - 2000	4 tempi
Semi-veloce	300 - 800	Generalmente 4 tempi
Lento	60 - 180	2 tempi

Tabella 2.1 Classificazione dei motori diesel in funzione di n

Il motore elettrico fu ideato negli anni '90 a causa della difficoltà di generare dei riduttori ad ingranaggi con un elevato rapporto di riduzione. Tali sistemi sono comunemente noti come impianti di propulsione turboelettrica e consistono in un impianto a vapore destinato alla produzione di energia elettrica la quale viene usata per alimentare il motore elettrico. Il motore elettrico infine è accoppiato al propulsore. Una soluzione analoga potrebbe essere ottenuta usando un motore diesel al posto di un impianto a vapore.

A questa soluzione impiantistica seguono numerosi vantaggi a discapito però di un costo impiantistico maggiore.

I principali vantaggi dell'impiego di un motore elettrico sono:

- Maggiore manovrabilità con possibilità di erogare una coppia elevata a basso numero di giri e facilità nell'inversione di marcia ottenibile agendo solo sul motore elettrico;
- Libertà nella collocazione del motore termico;
- Copertura con l'impianto motore anche delle esigenze di energia elettrica per i servizi di bordo.

I sistemi combinati sono la combinazione di più macchine marine viste in precedenza, furono introdotte siccome ogni diversa tipologia di motore presenta delle limitazioni piuttosto stringenti.

I primi sistemi combinati nacquero negli anni '70 trovando le loro prime applicazioni nei sommergibili; usavano degli impianti diesel-motore elettrico, quest'ultimo necessario siccome durante il periodo di immersione dovevano staccarsi dal processo di combustione a causa dell'assenza del comburente. Ad oggi hanno trovato larga applicazione ed operano massimizzando i vantaggi delle diverse tipologie di motore a loro disposizione in funzione delle varie condizioni di carico nel tempo.

Generalmente sono presenti due motori, uno base che viene usato per il normale funzionamento ed uno secondario che viene usato in pochi casi e per breve durata.

Esistono vari sistemi combinati, qui di seguito ne sono stati elencati alcuni:

- COSAG: Combined Steam and Gas;
- CODAD: Combined Diesel and Diesel;
- CODOG: Combined Diesel or Gas;
- CODAG: Combined Diesel and Gas;
- COGOG: Combined Gas or Gas;
- COGAG: Combined Gas and Gas.

2.3.1 FONTI ENERGETICHE DELLE MACCHINE MARINE

Le fonti energetiche principalmente usate nel settore marino sono i combustibili fossili, in particolare nel settore di nostro interesse ci sono quattro combustibili di maggior rilevanza [27]:

- Marine Diesel Oil – MDO
È un olio combustibile, in particolare è una miscela di gasolio e HFO ottenuto dalla distillazione intermedia del petrolio greggio. L'MDO è ampiamente usato nei motori diesel marini di media e medio-alta velocità.
Al contrario del combustibile diesel l'MDO non è un distillato puro ed inoltre presenta una densità maggiore;
- Heavy Fuel Oil – HFO
È un insieme di oli combustibili che sono caratterizzati da un'alta viscosità e densità, l'HFO si ottiene dai residui pesanti della distillazione, infatti ha un'elevata percentuale di molecole pesanti, di idrocarburi a catena lunga ed aromatici. Potenzialmente tutti i motori di media e bassa velocità utilizzano l'HFO che viene inoltre usato in impianti a vapore. Ha l'inconveniente che mentre lo si tiene nel serbatoio bisogna riscaldarlo comportando così una perdita del combustibile stesso per il suo stoccaggio;
- Boil Off Gas – BOG
Sono vapori derivanti dal metano liquido trasportato da metaniere, l'evaporazione avviene a causa del fenomeno del boil off;
- Marine Gas Oil – MGO
È un distillato leggero a basso tenore di zolfo, serve per alimentare gli impianti turbogas.

L'energia nucleare fu provata come fonte energetica per l'alimentazione dei propulsori. Il calore generato dal nocciolo o più precisamente dalle reazioni nucleari al suo interno, viene sottratto dal liquido refrigerante, che nel caso più comune è l'acqua, producendo così del vapore che successivamente viene espanso in turbina. Tuttavia, a causa di tutti i rischi connessi agli incidenti e dei danni che provocano le radiazioni generate dal decadimento radioattivo all'interno del nocciolo, non ha avuto applicazioni al di fuori delle navi combattenti [29].

A questi tipi convenzionali si sono aggiunte anche le fonti rinnovabili e le fonti d'energia non inquinanti come l'energia solare, quella eolica e quella dal moto ondoso. Tuttavia queste opzioni sono ancora in fase sperimentale.

2.3.2 MOTORE DIESEL

Il motore diesel si basa su un ciclo termodinamico avente il medesimo nome, il quale è un caso particolare del ciclo sabathé. Il ciclo diesel ha un predominio nei confronti del ciclo otto, affermazione non valida solamente per il settore automobilistico e per alcuni mercati di nicchia nel settore aeronautico.

Il motore diesel, visibile in figura 2.4, è un motore alternativo, chiamato così siccome converte il movimento traslatorio del pistone, locato all'interno del cilindro, in un movimento rotatorio dell'albero a gomiti usando l'accoppiamento biella-manovella.

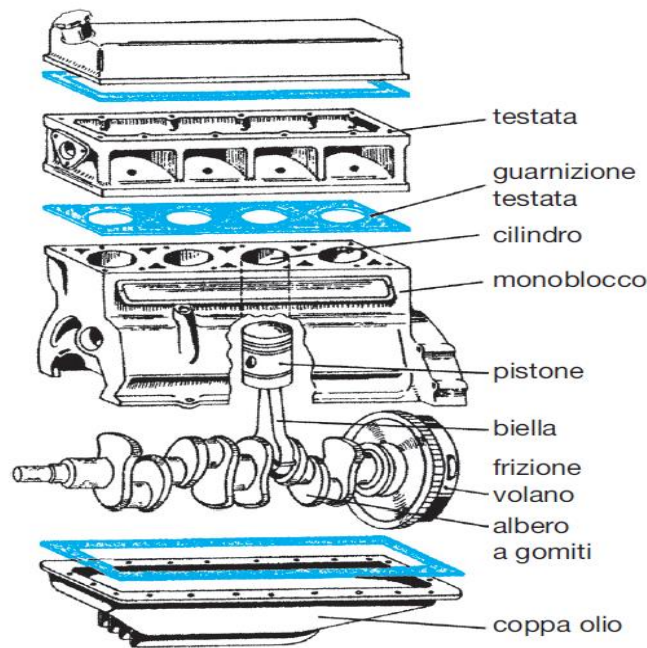


Figura 2.4 Motore a 4 cilindri esploso [27]

In questo ciclo termodinamico si usa come combustibile il gasolio. Il gasolio è un combustibile fossile ottenuto dalla raffinazione del petrolio greggio ed ha la caratteristica di essere un combustibile meno raffinato della benzina, perciò è di più facile produzione comportando un aumento della quantità prodotta con un prezzo più economico.

I suoi punti di accensione e di infiammabilità sono notevolmente più alti rispetto a quelli della benzina, così da rendere la sua conservazione nel serbatoio meno problematica dal punto di vista della sicurezza antincendio.

Anche se strutturati in maniera simile ai motori benzina, i motori diesel presentano una differenza nella fase di combustione che avviene con un'accensione spontanea.

Definiamo ora il rapporto volumetrico di compressione ρ :

$$\rho = \frac{V_T}{V_{CC}}$$

Dove:

- V_T : Volume totale, ovvero il volume fra la testata e il pistone quando si trova in PMI;
- V_{CC} : Volume della camera di combustione, ovvero il volume fra la testata ed il pistone quando si trova in PMS.

Aumentando adeguatamente ρ è possibile che l'aria al termine della compressione adiabatica abbia una temperatura tale per cui sia pari o superiore alla temperatura di autoaccensione, così che il combustibile bruci spontaneamente.

2.3.2.1 MOTORE DIESEL A 4 TEMPI

Una rappresentazione del motore diesel a 4 tempi la si vede in figura 2.5. Il pistone percorre un moto traslatorio fra il punto morto superiore (PMS) e il punto morto inferiore (PMI) all'interno di un cilindro dotato di un'apposita camicia e chiuso da una testata dove sono locate le valvole per l'immissione dell'aria di combustione e per l'emissione dei gas esausti. Si ha inoltre la presenza dell'iniettore che ha lo scopo di immettere il combustibile direttamente all'interno del cilindro. L'immissione di combustibile è la fase più delicata proprio perché avviene all'interno del cilindro. Essa si ha quando il pistone si trova nel PMS, quindi, siccome l'aria in quel momento è compressa, l'iniettore dovrà immetterla ad una certa pressione (anche fino a 30 bar) e ci sarà l'ulteriore necessità di avere una migliore polverizzazione del combustibile immesso.



Figura 2.5 Rappresentazione di un motore diesel 4 tempi [28]

Il ciclo diesel lo si rappresenta convenzionalmente sul piano di clapeyron (Figura 2.6).

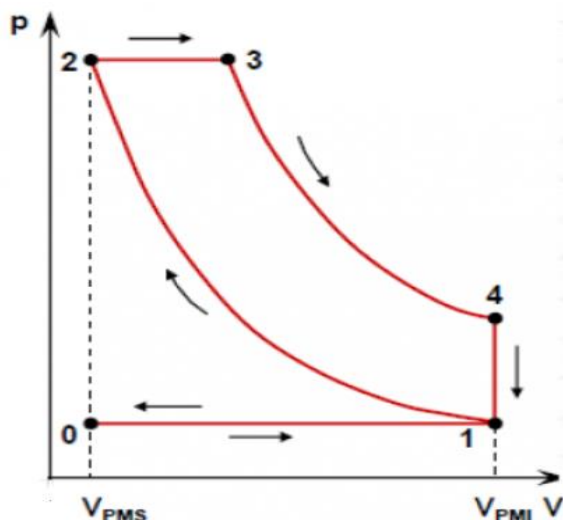


Figura 2.6 Ciclo diesel

Il ciclo diesel presenta le seguenti fasi:

- 0-1: Corsa di aspirazione;
- 1-2: Compressione adiabatica;
- 2-3: Combustione isobara;
- 3-4: Espansione adiabatica;
- 4-1: Scarico isocoro;
- 1-0: Corsa di scarico.

La peculiarità del ciclo diesel è la combustione isobara, questo avviene siccome il gasolio ha un tempo di combustione elevato e quindi bisogna tener conto dello spostamento del pistone che si sposterà da V_{PMS} a V_3 , questo spostamento compensa l'espansione dovuta alla combustione andando così a stabilizzare la pressione nell'arco temporale in cui sta avvenendo la combustione.

Aumentando ρ si ha come conseguenza un aumento della pressione che si ripercuote sulla struttura del motore. Essendoci in gioco delle pressioni maggiori gli spessori delle pareti dovranno essere maggiori, ciò comporta che il motore diesel rispetto quella a benzina, a parità di potenza, risulta più pesante.

2.3.2.2 MOTORE DIESEL A 2 TEMPI

La differenza fondamentale tra il ciclo a 2 tempi e quello a 4 tempi è che il primo si completa con due corse del pistone dal PMI al PMS, mentre nel 4 tempi il ciclo si chiude con quattro corse del pistone. Sotto il punto di vista strutturale del motore si ha la presenza delle luci al posto delle valvole. Le luci possono essere chiuse, parzialmente aperte o aperte a secondo dalla posizione del pistone. Quando il pistone si trova in prossimità del PMI le luci risulteranno scoperte. Esistono due tipi di luci, quelle che servono per l'immissione del comburente che vengono chiamate luci di aspirazione e quelle che servono per lo scarico dei gas esausti, comunemente note come luci di scarico. Attraverso le luci di aspirazione si ha l'immissione del comburente che viene introdotto ad una pressione tale da risultare maggiore della pressione dei gas esausti presenti all'interno del cilindro. Questa fase, chiamata di lavaggio, veniva fatta storicamente trasversalmente e in seguito fu rimpiazzata dal lavaggio longitudinale che permetteva uno sfruttamento migliore dell'energia dei gas di scarico così da rendere superflua la presenza del compressore volumetrico.

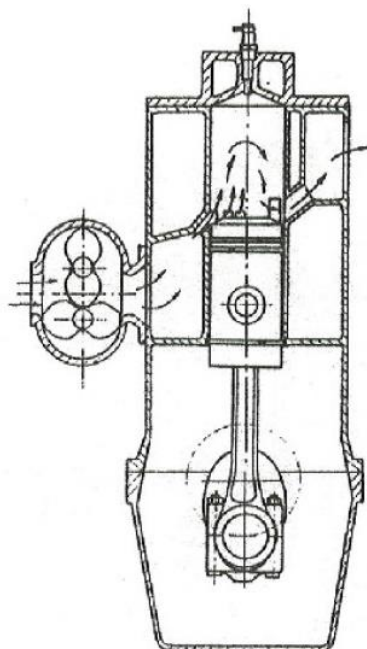


Figura 2.7 Motore diesel 2 tempi con compressore volumetrico [30]

2.3.2.3 CONFRONTO FRA IL 2 TEMPI ED IL 4 TEMPI

I vantaggi principali del motore a 2 tempi nei confronti di quello a 4 tempi sono:

- **Maggiore potenza specifica:**
Questo siccome ha un numero di tempi minore, quindi a parità di peso e cilindrata erogherà teoricamente il doppio della potenza. In realtà si ha un aumento della potenza più limitato a causa di un lavaggio meno accurato;
- **Maggiore semplicità strutturale:**
Il motore a 2 tempi presenta una maggiore semplicità nella fase di costruzione per l'assenza delle valvole;
- **Fornisce una coppia motrice più uniforme:**
Vantaggio rilevante solo nel caso in cui ci sia un unico cilindro siccome la spinta generata dall'espansione avviene a ogni giro di manovella.

Gli svantaggi del 2 tempi nei confronti del 4 tempi sono:

- **Minore rendimento:**
Impossibilità di sfruttare tutta la corsa del pistone nella fase di espansione siccome nel motore a 2 tempi si usano le luci e non le valvole;
- **Ricambio del fluido meno efficiente:**
Fase di ricambio meno efficace del 4 tempi intaccando la qualità del nuovo fluido in ingresso;
- **Aumento delle sollecitazioni termiche e meccaniche.**

Nel caso di motore diesel lento a 2 tempi si ha un ulteriore vantaggio: questo motore ha la possibilità di effettuare un lavaggio più accurato con l'utilizzo della turbosovralimentazione, portando così ad un aumento del rendimento [31].

In funzione dei vantaggi e degli svantaggi intrinseci dei due si sono definiti automaticamente i loro settori di applicazione a seconda delle esigenze delle navi usate in quel determinato settore.

Facendo un esempio, nel caso delle navi da carico a causa delle loro dimensioni e tragitti hanno un'esigenza predominante di contenere il costo del combustibile durante l'esercizio. Questo fattore legato alla spesa del combustibile ha comportato la predominanza del motore diesel a 2T. Un secondo esempio lo si può fare nel caso dei traghetti e delle navi Ro-Ro dove il problema principale è lo spazio disponibile. Dato che a parità di potenza erogata il 2T occupa un maggiore spazio in esse la scelta ricadrà nel motore diesel a 4T.

2.3.2.4 PARAMETRI CARATTERISTICI DEI MOTORI DIESEL

Il cilindro viene definito univocamente in funzione dei seguenti parametri geometrici:

- Corsa, L : rappresenta la lunghezza massima che il pistone percorre all'interno del cilindro, ovvero la distanza fra il PMS ed il PMI. La corsa viene determinata dal raggio di manovella attraverso la relazione: $L = 2a$;
- Alesaggio, D : è il diametro del cilindro, coinciderà con il diametro del pistone;
- Volume della camera di combustione, V_s : è il volume in cui è racchiuso il comburente al momento dell'inizio della combustione. In tale momento il pistone si troverà nel PMS.
- Cilindrata, V : la cilindrata rappresenta la differenza di volume che il comburente subisce durante la compressione. Analiticamente, considerando z cilindri, la cilindrata si calcola:

$$V = z \pi \frac{D^2}{4} L$$

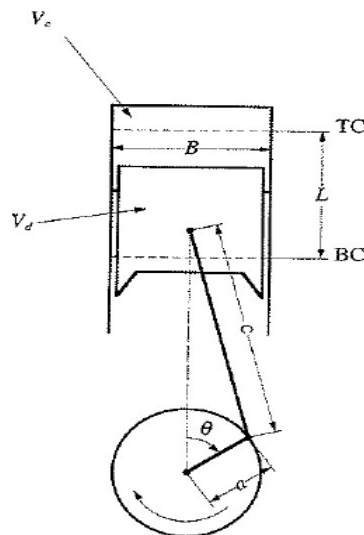


Figura 2.8 Parametri geometrici di un motore diesel [30]

A partire dai parametri geometrici introdotti si possono ricavare dei parametri adimensionali caratteristici del motore:

- Rapporto Corsa-Alesaggio: $\frac{L}{D}$;
- Rapporto di compressione: $r = \frac{V + V_s}{V_s}$;
- rapporto lunghezza di biella e raggio di manovella: $\frac{c}{a}$.

Un ultimo parametro importante è la velocità media del pistone u_m che è una grandezza proporzionale sia alla corsa che al numero di giri dell'albero n :

$$u_m = 2 C n$$

Il fine delle reazioni fra comburente e combustibile all'interno del motore è il trasferimento di lavoro dall'espansione dei gas al pistone, graficamente nel piano di clapeyron è rappresentato dall'area compresa all'interno delle fasi caratteristiche del ciclo diesel raffigurate in figura 2.6. Per ogni pistone del motore si avrà un lavoro L_i , detto lavoro indicato. Il lavoro indicato lo si calcola con un'integrazione su un ciclo della pressione rispetto il volume infinitesimo:

$$L_i = \oint p \, dv$$

Da L_i si ricava la potenza indicata e quella effettiva:

$$N_i = p_{mi} \cdot V \frac{2n}{n_r}$$

$$N_{eff} = p_{me} \cdot V \frac{2n}{n_r}$$

Con:

- $p_{mi} = \frac{L_i}{V}$: la pressione media indicata;
- $p_{me} = \frac{L_e}{V} = p_{mi} \eta_m$: la pressione media effettiva;
- L_e : lavoro erogato dall'albero;
- n_r : il numero di tempi del motore;
- n : numero di giri (giri/secondo).

La potenza indicata e quella effettiva non sono mai uguali siccome sono sempre presenti delle perdite meccaniche, rappresentate dal rendimento meccanico η_m . Il rendimento globale η_g è ottenuto dal prodotto di più rendimenti, generalmente si tiene conto oltre che del rendimento meccanico anche di quello di combustione e del ciclo. Il rendimento di combustione viene definito come il rapporto fra il calore effettivamente generato dalla combustione e il calore teoricamente producibile dalla combustione stessa, quest'ultimo calcolato con il potere calorifico inferiore (LHV). Il rendimento del ciclo viene definito come il rapporto fra il lavoro indicato ed il calore fornito.

$$N_i \neq N_{eff} \rightarrow N_f = N_i - N_{eff}$$

$$\eta_m = \frac{N_{eff}}{N_i} = 1 - \frac{N_f}{N_i}$$

$$\eta_i = \frac{L_i}{Q_i}$$

$$\eta_c = \frac{Q_{in}}{\dot{m}_f LHV}$$

$$\eta_g = \eta_m \eta_c \eta_i$$

Un parametro utile per valutare l'efficienza del motore è il consumo specifico che rappresenta il consumo di energia del motore per unità di potenza erogata:

$$c_s = \frac{\dot{m}_f}{N_{eff}} \rightarrow \eta_g = \frac{1}{c_s LHV}$$

2.3.2.5 CURVE CARATTERISTICHE DEI MOTORI DIESEL

Le curve caratteristiche di un motore a combustione interna sono gli andamenti della potenza, della coppia e del consumo specifico al variare del numero di giri n .

Le generiche curve caratteristiche di un motore a combustione interna sono riportate in figura 2.9:

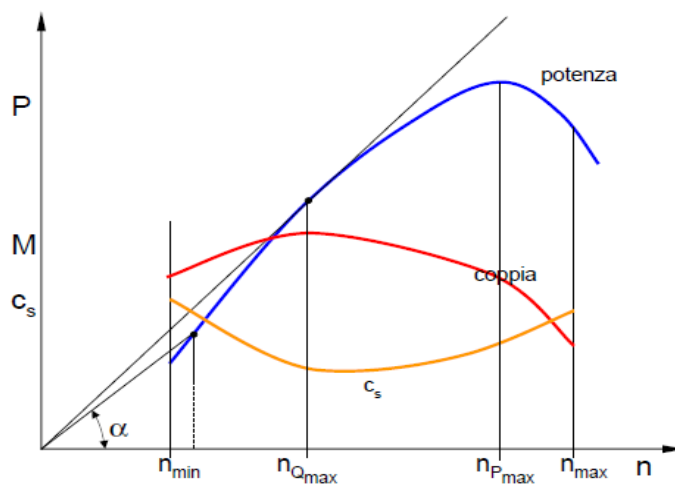


Figura 2.9 Curve caratteristiche di un MCI a carico massimo [32]

Le curve vengono tracciate a seguito di prove bloccando l'organo di regolazione del combustibile. Le curve sono infinite però quelle più significative sono quelle ottenute bloccando il carico al 100%. In figura 2.10 sono riportate le variazioni delle curve della coppia e della potenza nel caso in cui il carico non fosse al 100%:

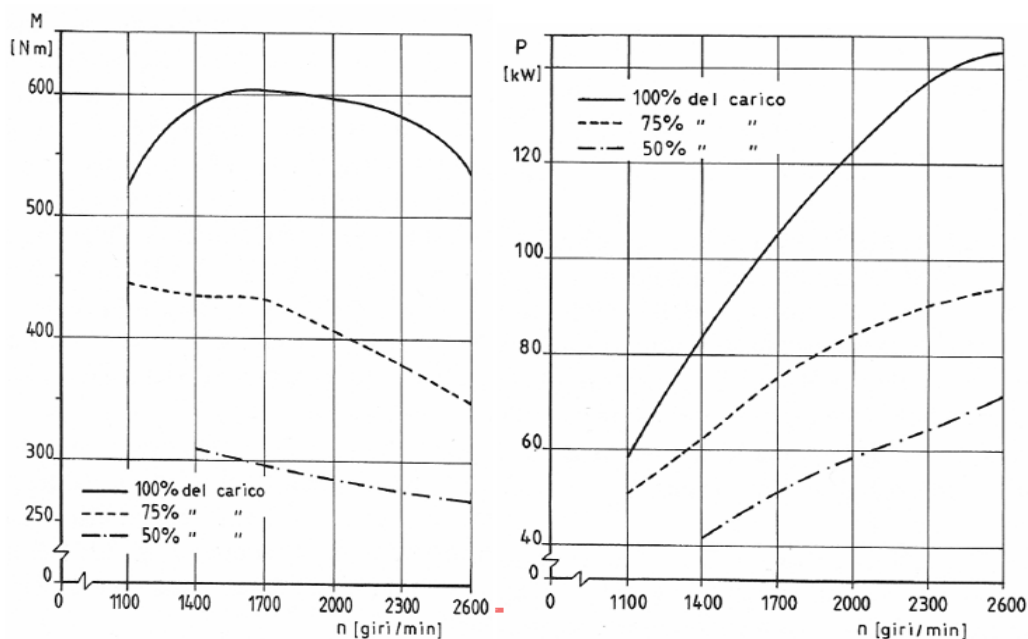


Figura 2.10 Variazione delle curve caratteristiche al variare del carico [32]

2.3.2.6 GESTIONE DEL CARICO DEL MOTORE DIESEL

La pianificazione del motore e successivamente la gestione del suo carico sono delle fasi cruciali.

La pianificazione del motore consiste nello studio a lungo termine, ottenendo alla fine di questa fase le caratteristiche impiantistiche che convengono maggiormente. Questa fase si basa sulla previsione del carico e dei picchi. Tali previsioni vengono ottenute attraverso metodi diretti o indiretti. La scelta dell'impianto più idoneo la si ottiene attraverso uno studio di economicità ponderando la capacità d'investimento con le ore di funzionamento.

La seconda fase è la gestione economica del carico, la quale ha l'obiettivo di garantire il soddisfacimento del carico nel modo meno oneroso possibile. Uscendo dal punto di design si ha una variazione del carico che comporta una diminuzione del rendimento e perciò un aumento dei consumi specifici secondo la relazione:

$$\eta_g = \frac{1}{C_s LHV}$$

Per gestire i sistemi energetici è perciò fondamentale conoscere il loro comportamento anche nelle condizioni di off-design.

Nota il consumo specifico in funzione del carico $HR(P)$ ed il costo del combustibile per unità di energia λ si possono ricavare attraverso le seguenti relazioni la potenza introdotta P_i ed il costo orario M :

$$P_i = HR(P) P$$

$$M = \lambda P_i = \lambda HR(P) P$$

Da quest'ultima uguaglianza si vede che M è funzione solamente di P perciò andando a derivare M rispetto a P ed omettendo le variabili si ottiene il seguente risultato:

$$\frac{dM}{dP} = \lambda \left(HR + P \frac{dHR}{dP} \right)$$

Questa nuova grandezza è definita come costo incrementale IL , mentre la grandezza interna alla parentesi è il consumo incrementale.

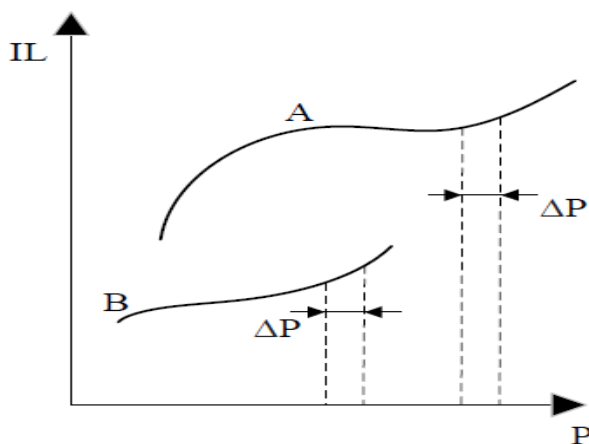


Figura 2.11 Piano potenza-costo incrementale [33]

In figura 2.11 si può vedere tracciate due curve di IL di due sistemi energetici differenti al variare di P . Consideriamo che entrambi debbano soddisfare assieme una richiesta di potenza iniziale P_0 ed a seguito di una diminuzione della potenza richiesta, quella nuova sia pari a P_1 . La variazione di potenza è stata indicata in figura 2.11 con $\Delta P (= P_0 - P_1)$. Per ridurre la potenza erogata è possibile agire su entrambi i sistemi però essi andranno a impattare su M in maniera diversa. La variazione di M risulterà pari a:

$$\Delta M = \int_{P_0}^{P_1} IL \, dP$$

La variazione di potenza impatterà su M in maniera minore nel caso B siccome l'area sottesa alla curva B è minore. Nel caso opposto, ovvero che la potenza erogata inizialmente sia P_1 e che ci sia un aumento della potenza richiesta ΔP , converrà in quel caso agire sul sistema B, dato che incrementerà il costo M di una quantità minore.

2.4 COGENERAZIONE E TRIGENERAZIONE

La cogenerazione (CHP) si definisce come la produzione combinata di calore e lavoro utile da un unico sistema energetico. Il lavoro utile prodotto è lavoro meccanico che generalmente in seguito viene usato per la produzione di energia elettrica utilizzando un alternatore.

Nel caso in cui ci sia un terzo output utile di energia frigorifera dal nostro sistema energetico non si parla più di cogenerazione ma di trigenerazione (CCHP).

La cogenerazione è una conseguenza della tendenza ad aumentare l'efficienza energetica dei sistemi e quindi di andare a ridurre al minimo gli sprechi energetici. Da ciò si può intuire che gli impianti di cogenerazione sono delle modifiche di impianti già noti. Una conseguenza dell'aumento del rendimento è la riduzione delle emissioni a parità di utile prodotto.

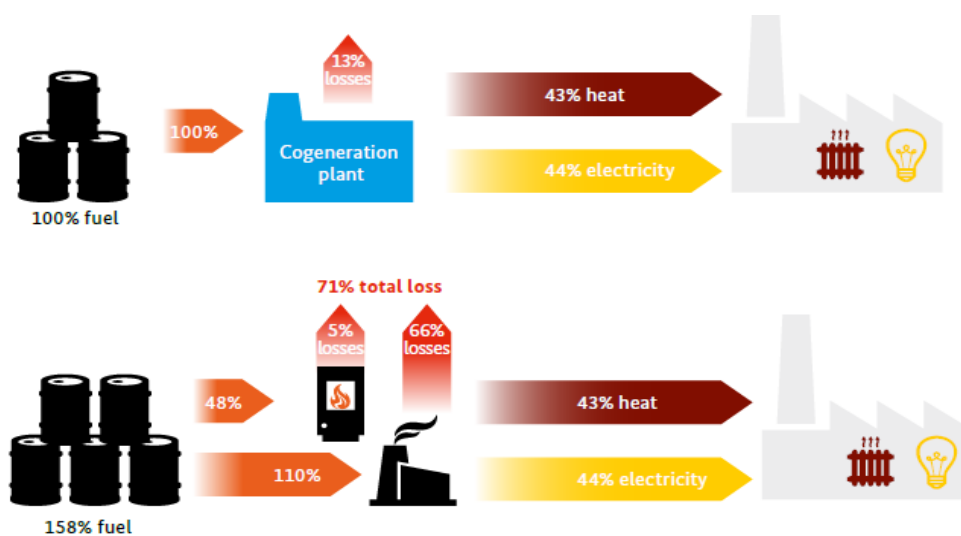


Figura 2.12 Confronto fra sistema cogenerativo e sistemi separati [34]

Dalla figura 2.12 si vede che a parità di *output* utile la cogenerazione permette una riduzione delle perdite ed una riduzione del combustibile usato, infatti una condizione necessaria ma non sufficiente per la definizione di un impianto cogenerativo è proprio che il combustibile usato dal sistema cogenerativo sia inferiore rispetto a quello dei due impianti separati.

Esistono varie soluzioni impiantistiche cogenerative, tra cui:

- Gruppo cogenerativo con turbina a gas;
- Gruppo cogenerativo con turbina a vapore;
- Gruppo cogenerativo con ciclo combinato;
- Gruppo cogenerativo con celle a combustibile;
- Gruppo cogenerativo con motore alternativo.

La cogenerazione trova idealmente applicazione nel caso in cui le richieste energetiche siano costanti, in particolar modo quella termica, infatti uno dei problemi principali della cogenerazione è che l'energia termica non è accumulabile. Alcuni esempi dei luoghi e dei settori in cui la cogenerazione trova applicazione sono l'industria, le prigioni, gli ospedali e gli hotel.

2.4.1 RENDIMENTI DELLA COGENERAZIONE E MODI DI OPERARE

Come definito la cogenerazione e la trigenerazione hanno più *output* utili, ai quali gli si associa un rendimento:

$$\text{Rendimento termico: } \eta_{th} = \frac{Q_{th}}{\dot{m}_f LHV}$$

$$\text{Rendimento elettrico: } \eta_e = \frac{P_e}{\dot{m}_f LHV}$$

$$\text{Rendimento globale: } \eta = \frac{Q_{th} + P_e}{\dot{m}_f LHV} = \eta_{th} + \eta_e$$

Con:

- Q_{th} : Potenza termica;
- P_m : Potenza elettrica;
- Q_{fr} : Potenza frigorifera.

La CCHP ha un ulteriore parametro che serve a definire le prestazioni del gruppo frigorifero. I gruppi frigoriferi possibili sono due, il primo è quello a compressione, caratterizzato da coefficienti di prestazioni più elevati, mentre il secondo è quello ad assorbimento che usa parte del calore prodotto. Il gruppo frigorifero a compressione usa parte dell'elettricità prodotta per alimentare un compressore, mentre il gruppo frigorifero ad assorbimento usa una parte del calore prodotto e perciò assorbe una forma energetica meno pregiata.

A seconda che si utilizzi una fonte o l'altra è possibile definire due parametri diversi. Le prestazioni dei gruppi frigoriferi vengono rappresentati dall'Energy Efficiency Ratio (EER):

$$EER = \frac{Q_{fr}}{P_e} \quad \text{Rappresenta l'efficienza del gruppo frigoriferi a compressione}$$

$$EER = \frac{Q_{fr}}{Q_{th}} \quad \text{Rappresenta l'efficienza del gruppo frigorifero ad assorbimento}$$

Un limite nel caso del gruppo frigorifero ad assorbimento è che può soddisfare il fabbisogno frigorifero fino ad una temperatura intorno ai 3-4 °C, per temperature inferiori la scelta può essere unicamente installare un gruppo frigorifero a compressione.

Dato che il cogeneratore deve soddisfare una doppia richiesta, può succedere che abbiamo degli andamenti opposti, a seconda della priorità e delle possibilità impiantistiche si possono definire due casi:

- Elettrico segue

In questa modalità la potenza termica da fornire ha la priorità.

Consideriamo che l'utenza richieda un Q_{th}^* , allora è possibile definire:

$$\%carico = \frac{Q_{th}^*}{Q_{des}}$$

La definizione della percentuale di carico non definisce la richiesta ma la produzione di energia elettrica:

$$P_{el} = \%carico P_{des}$$

A seconda che la P_{el} sia minore o maggiore di quella richiesta dall'utenza dovrà rispettivamente essere comprata o venduta/accumulata.

- Termico segue

Nel termico segue l'energia elettrica da produrre ha la priorità nei confronti della domanda della potenza termica.

In maniera analoga al caso precedente si definisce la percentuale del carico:

$$\%carico = \frac{P_{el}^*}{P_{des}}$$

La potenza termica prodotta risulterà:

$$Q_{th} = \%carico Q_{des}$$

Questa potenza termica a seconda che sia maggiore o minore di quella richiesta dovrà essere dissipata, con una conseguente diminuzione del rendimento globale, oppure integrata, per esempio attraverso una caldaia ausiliaria.

2.4.2 GRUPPI COGENERATIVI CON MOTORE ALTERNATIVO

Un motore alternativo ha la funzione di produrre una potenza meccanica rappresentata dalla rotazione dell'albero a gomiti. Facendo un bilancio dell'energia totale di un motore alternativo si ha che una parte viene fornita all'albero come energia meccanica, una parte è presente nei gas esausti sotto forma di calore e una parte viene smaltita nei sistemi di raffreddamento del motore ripartiti fra il sistema di raffreddamento ad acqua e quello ad olio. Nel caso in cui sia sovralimentato sarà inoltre presente un intercooler.

Per ottenere l'assetto cogenerativo dal motore alternativo bisogna usare il calore smaltito dai sistemi di raffreddamento, ma soprattutto il calore dei gas esausti per la produzione di acqua calda. Un'altra possibilità è che al posto della produzione di acqua calda si utilizzi, come succede in qualsiasi automobile, il calore prodotto per il riscaldamento.

Questa configurazione oltre ad essere una di quelle più ampiamente usate è quella che si utilizza negli impianti per la propulsione navale.

In una nave possono essere presenti differenti richieste energetiche:

- Energia meccanica:
L'energia meccanica è presente solamente durante il moto della nave e viene fornita dal motore a combustione interna all'albero a gomiti per mettere in rotazione il propulsore;
- Energia elettrica:
La domanda di energia elettrica è presente sia durante il moto della nave che durante il periodo di ormeggio. L'energia elettrica serve principalmente per l'illuminazione ed il funzionamento dei dispositivi di bordo;
- Energia termica:
L'energia termica viene richiesta per soddisfare la domanda di acqua sanitaria, di riscaldamento e per l'alimentare degli impianti di dissalazione per la produzione di acqua potabile.

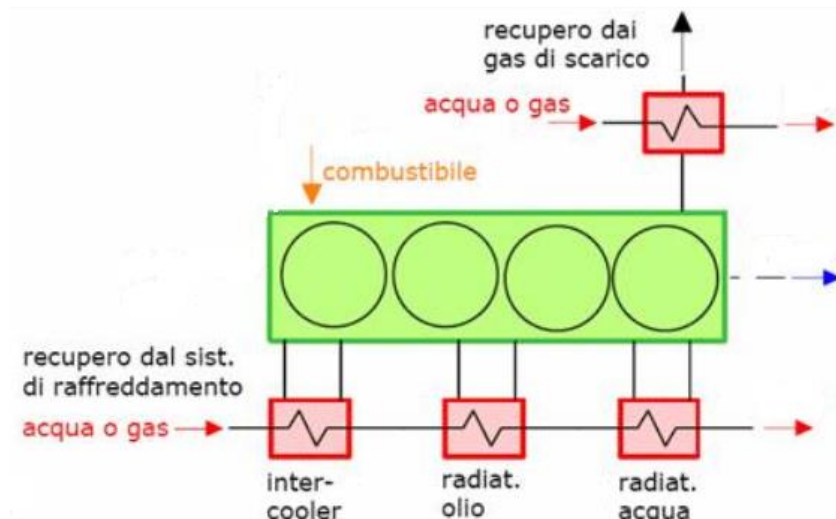


Figura 2.13 Gruppo cogenerativo con motore a combustione interna

Nella figura 2.13, che raffigura un motore a combustione interna sovralimentato, sono rappresentate le quattro sorgenti di calore, queste vengono sfruttate attraverso degli scambiatori. Le fonti di calore recuperabili per scopi cogenerativi sono:

- **Recupero dai gas di scarico:**
Rappresenta la sorgente di calore più pregiata avendo una temperatura prossima ai 400°C. Il calore che effettivamente viene recuperato rappresenta una quota che si aggira attorno al 50%. Non tutto il calore dei fumi è recuperabile, ma si ha un limite minimo di temperatura pari a 140°C sotto il quale si presenterebbero dei problemi di condense acide in zona di scarico con conseguente corrosione e diminuzione della vita delle parti impiantistiche a contatto con le condense;
- **Recupero dal sistema di raffreddamento ad acqua:**
Rappresenta la seconda sorgente di calore recuperabile più pregiata. L'acqua esce con una temperatura intorno ai 90°C e rappresenta il 25% del calore recuperato in assetto cogenerativo;
- **Recupero dal sistema di raffreddamento ad olio:**
L'olio esce con una temperatura attorno ai 70-90°C da cui si riesce a recuperare il 10% del calore totale;
- **Recupero dall'aria di sovralimentazione:**
È un recupero presente solo nel caso di sovralimentazione, l'aria in uscita dall'intercooler viene generalmente raffreddata fino a 60-80°C, da cui si recupera del calore che è intorno al 15% del calore totale recuperato.

CAPITOLO 3

ANALISI E OTTIMIZZAZIONI DI MOTORI IBRIDI

3.1 DESCRIZIONE DEL CASO PRESO IN ANALISI

Il caso analizzato in questa tesi si basa sulla navigazione di una petroliera. Il suo percorso annuale è stato suddiviso in dodici sotto-percorsi, siccome la nave percorre la stessa tratta ogni mese.

I porti nei quali la petroliera ormeggia sono:

- Dalian, Cina;
- Shanghai, Cina;
- Hong Kong, Hong Kong;
- Singapore, Singapore;
- Matara, Sri Lanka;
- Aden, Yemen.

Il primo gennaio di ogni anno la nave è attraccata nel porto di Dalian e salpa con direzione Aden, fermandosi in ogni porto nell'ordine in cui sono stati appena elencati. Il periodo di navigazione da Dalian a Aden ha una durata di venti giorni; i restanti giorni del mese la nave ormeggerà nel porto di Aden. Il mese seguente percorrerà lo stesso percorso a ritroso, e continuerà così per tutta la durata dell'anno.

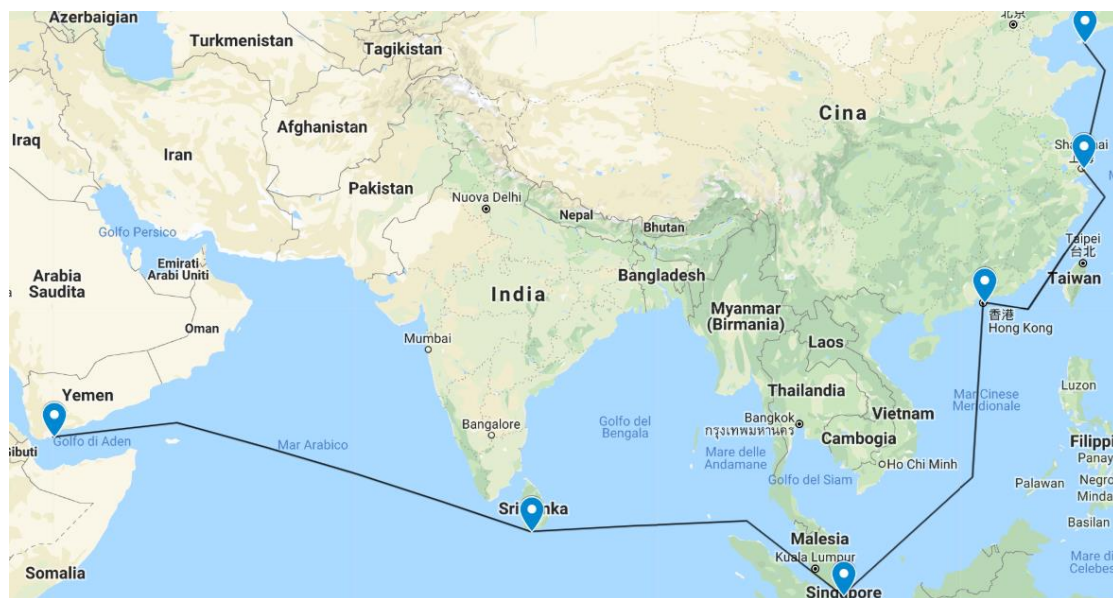


Figura 3.1 Tragitto di navigazione della petroliera

Le dimensioni note della petroliera sono la sua lunghezza, la sua larghezza, la sua altezza ed il suo peso, che sono rispettivamente 332,95 m, 60 m, 30,5 m e 100.000 t.

La petroliera può essere soggetta a cinque differenti tipi di richieste, esse sono l'ancoraggio, la fase di carico/scarico, il docking, la navigazione regolare e la navigazione a massima velocità. I carichi richiesti durante queste fasi sono riportati in figura 3.2:

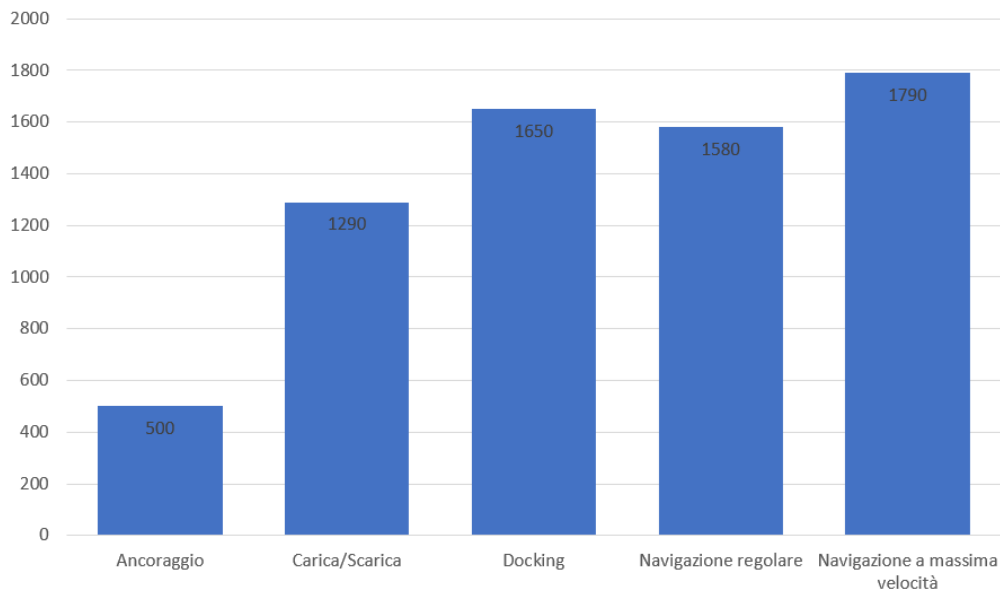


Figura 3.2 Carichi della nave [kW – condizioni della nave]

A seconda di dove si trova la nave, richiederà un carico fra i cinque possibili. I primi tre, ovvero l'ancoraggio, la fase di carico/scarico e il docking sono peculiari dei periodi in cui è in porto, mentre le due tipologie di navigazione possibili sono peculiari dei tragitti fra i porti.

La nave stazionerà in ogni porto per un tempo predefinito di ore ed esse varieranno a seconda del porto in cui è ormeggiata. In tabella 3.1 sono riportate le ore per ogni porto in cui viene richiesta una determinata potenza.

	Ore nei porti			
	Totale	Ancoraggio	Carico/Scarico	Docking
Dalian	12	4	6	2
Shanghai	10	0	8	2
Hong Kong	20	4	14	2
Singapore	19	5	12	2
Matara	15	6	7	2
Aden	12	4	6	2

Tabella 3.1 Distribuzione dei carichi nei porti

Gli intervalli temporali fra la navigazione regolare e quella a massima velocità sono stati stimati siccome non sono disponibili dati affidabili. Facendo l'ipotesi di velocità costante su tutto il tragitto si può ricavare attraverso la distanza percorsa dalla nave ed il tempo di navigazione, la velocità media.

La distanza percorsa dalla nave è stata stimata. Il calcolo è stato fatto ipotizzando il tragitto riportato in figura 3.1, mentre il tempo di navigazione è stato calcolato dalla durata totale di

navigazione, che come detto precedentemente è di 20 giorni, dai quali sono state sottratte le ore in cui la nave è ormeggiata in porto.

Dalla velocità media e dalle distanze stimate fra i porti, si sono stimati i tempi di navigazione fra un porto e l'altro, che sono:

- Dalian – Shanghai: 30 ore;
- Shanghai – Hong Kong: 52 ore;
- Hong Kong – Singapore: 87 ore;
- Singapore – Matara: 101 ore;
- Matara – Aden: 134 ore.

Noti gli intervalli temporali di navigazione è necessario introdurre un'ulteriore approssimazione su come vengono ripartite le due tipologie di navigazione. Ipotizzando che la navigazione regolare venga utilizzata solamente per i periodi di prossimità ai porti, quindi le ore sono costanti per ogni tragitto indipendentemente dalla lunghezza di esso, in particolare è stato fissato un numero di ore pari a 16, mentre la restante parte delle ore si considera che la richiesta della nave sia di velocità massima, perciò:

	Ore di navigazione		
	Totale	Navigazione regolare	Navigazione a velocità massima
Dalian – Shanghai	30	16	14
Shanghai – Hong Kong	52	16	36
Hong Kong – Singapore	87	16	71
Singapore – Matara	101	16	85
Matara – Aden	134	16	118

Tabella 3.2 Distribuzione dei carichi durante la navigazione [ore]

Il carico richiesto dalla nave viene fornito dal motore ibrido che è composto da un motore diesel, pannelli fotovoltaici ed un accumulatore.

Il motore diesel, nonostante siano presenti i pannelli fotovoltaici e la batteria, dovrà essere capace di fornire una potenza pari alla richiesta massima che potrebbe avere la nave, ovvero di 1.790 kW. Questo siccome ci si potrebbe trovare nella condizione in cui la nave richieda una potenza di 1.790 kW e in quell'istante i pannelli e la batteria non possano fornire nessun contributo, per esempio nel caso in cui la batteria sia scarica e sia notte.

Introduciamo ora il carico come rapporto fra la potenza richiesta dalla nave e la potenza massima erogabile, il motore diesel ha un rendimento che è funzione del carico e il punto di rendimento massimo corrisponde generalmente con il punto di design. Nel nostro caso il punto di rendimento massimo lo si ha quando il carico è pari a 1, ovvero quando la potenza richiesta dalla nave corrisponde a quella massima.

Il legame del rendimento al carico è visibile in figura 3.3, dal quale si vede che si prediligono dei carichi maggiori siccome implicano un rendimento maggiore.

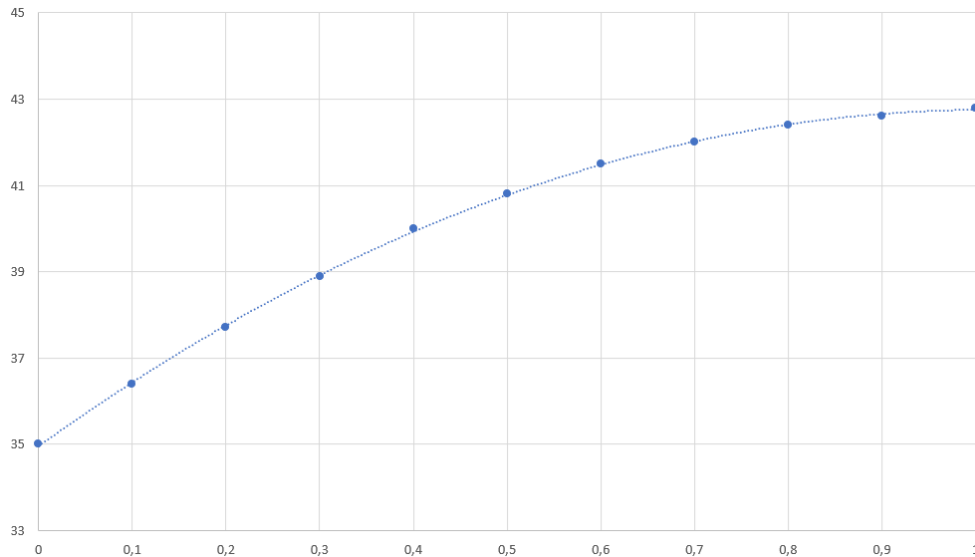


Figura 3.3 Curva carico-rendimento [% - Adim.]

I pannelli fotovoltaici presenti sulla petroliera hanno una superficie di 2.000 m² ed un rendimento del 17%. Per il calcolo della potenza prodotta dai pannelli fotovoltaici si è utilizzata l'ipotesi che sia presente un inseguitore solare, ovvero un dispositivo con lo scopo di orientare i pannelli così che essi captino i raggi solari con la inclinazione più efficace. Inoltre si sono trascurate le oscillazioni di rollio e beccheggio della nave.

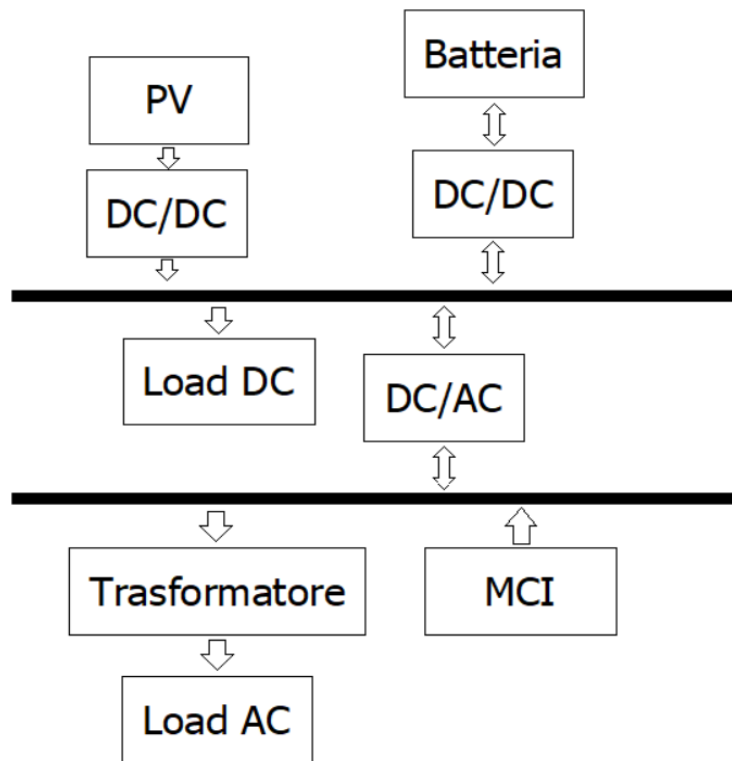


Figura 3.4 Schema impiantistico del motore ibrido

3.2 CENNI SU VBA

Il linguaggio usato per scrivere il programma è Visual Basic for Application (VBA). VBA consiste in una implementazione a Visual Basic e viene classificata come un linguaggio di programmazione ad alto livello. Un linguaggio di programmazione ad alto livello è progettato per far sì che sia facilmente comprensibile dall'uomo, però discostandosi dal linguaggio di macchina i linguaggi ad alto livello dovranno essere tradotti ed interpretati da un programma.

I principali oggetti presenti in VBA sono le macro, ovvero una serie di operazioni che vengono eseguite automaticamente e le funzioni. Le funzioni si discostano dalle macro siccome hanno bisogno di almeno un dato di *input*, numerico o testuale, che rappresenta una variabile indipendente.

In seguito vengono introdotte le caratteristiche basilari usate per lo sviluppo del codice, facendo una rapida panoramica per poter comprendere a fondo la logica che è stata utilizzata.

Variabili:

Le variabili sono elementi che contengono una certa mole di dati e sono capaci o meno di contenere un dato in funzione alla grandezza del dato da memorizzare e dal tipo di dato. La definizione di una variabile è fatta usando la seguente dicitura:

`Dim NomeVariabile As TipoVariabile`

I tipi delle variabili che possono essere scelte sono:

- Boolean: memorizza variabili booleane (True or False);
- Byte: memorizza i numeri naturali da 0 a 255;
- Currency: memorizza valori monetari da -922 a 922;
- Date: memorizza date e orari;
- Double: memorizza valori decimali a precisione doppia;
- Integer: memorizza valori naturali con segno da -32.768 a 32.767;
- Long: memorizza valori con segno da -2.147 a 2.147;
- Object: memorizza un riferimento all'oggetto (dipende dal tipo di oggetto);
- Single: memorizza valori decimali a singola precisione;
- String: memorizza stringhe alfanumeriche;
- Variant: memorizza qualsiasi tipo.

Le variabili possono venir usate nelle operazioni, sia come dati di input che come dati di output che come valori intermedi. Le variabili di input possono essere definite all'interno del codice oppure essere richiamate da un foglio Excel, nel secondo caso bisogna introdurre il linguaggio con cui è possibile richiamare un valore che è locato all'interno di una cella.

`NomeVariabileInput = Worksheets("NomeFoglio").Cells(NumeroRiga ,NumeroColonna)`

Nel caso di variabili di output si ha la dicitura opposta, ovvero si fissa che una determinata cella assume il valore dell'*output*.

`Worksheets("NomeFoglio").Cells(NumeroRiga ,NumeroColonna) = NomeVariabileOutput`

Costruttori:

I costruttori nella nostra applicazione li possiamo suddividere in due gruppi, le istruzioni condizionali ed i cicli. Entrambi consistono in elementi che permettono di eseguire una serie di operazioni. Nel caso di istruzioni condizionali si ha che si verificano una serie di operazioni solo in determinate condizioni.

Le istruzioni condizionali le possiamo suddividere in:

- If semplice
If CondizioneBooleana Then
Operazioni
End If
Si ha una successione di operazioni che si eseguono solo nel caso in cui la condizione booleana sia uguale a 1, ovvero quando la condizione booleana è vera.
- If Then Else
If CondizioneBooleana Then
Operazioni1
Else
Operazioni2
End If
Come logica è identica all'If semplice, l'unica differenza è che nel caso in cui la condizione booleana non fosse verificata nel primo caso si ha che non vengono eseguite alcune operazioni, mentre in questo caso vengono eseguite le *Operazioni2*.
- If Then ElseIf
If CondizioneBooleana1 Then
Operazioni1
ElseIf CondizioneBooleana2 Then
Operazioni2
ElseIf CondizioneBooleana3 Then
...
End If
Questa istruzione condizionale differisce dalla precedente per il fatto che in questa versione è possibile suddividere le casistiche in un numero maggiore a due, permettendo di far compiere le *OperazioniN* interne ad una condizione solo nel caso in cui si verifica la *CondizioneBooleanaN*.

I cicli servono per eseguire una serie di operazioni per un numero di volte definito, in questo caso è stato utilizzato il ciclo For.

```
For IndiceIterativo = ValoreIniziale To ValoreFinale  
Operazioni  
Next IndiceIterativo
```

In questo caso le operazioni verranno eseguite un numero di volte pari a (ValoreFinale – ValoreIniziale +1).

3.3 LOGICA DEL MODELLO

Nel seguente paragrafo è presente tutta l'attività sperimentale della tesi. Si inizierà a fare una descrizione dell'interfaccia con l'utente descrivendo gli *UseForm* e la composizione delle tabelle nelle quali verranno riportati gli *output*. Successivamente vengono riportati gli schemi ad albero del codice, ovvero la successione delle verifiche delle condizioni per individuare il caso in cui ci si trova. Per ultimo vengono riportati i risultati ottenuti nelle varie configurazioni del codice. I risultati dipendono dal tipo di codice sviluppato che intrinsecamente è connesso ad un tipo diverso di sistema energetico.

3.3.1 INSERIMENTO DEI DATI DI INPUT

L'avviamento del codice e quindi dei calcoli avviene con il click del comando "Andamento temporale delle potenze" posizionato a destra della tabella in cui sono riportate le potenze nel foglio di calcolo "CarichiOrari". A seguito del click del comando, che lo si può vedere in figura 3.5, compare lo *UseForm* "PotenzePerOgniOraMese".

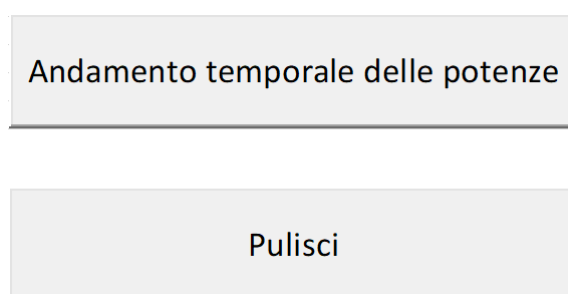


Figura 3.5 Comandi per calcolare la distribuzione dei carichi in "CarichiOrari"

Lo *UseForm*, che lo si può vedere graficamente in figura 3.6, è composto da una *Listbox* nella quale bisogna selezionare l'intervallo temporale che si vuole analizzare, dal tasto "Inserisci" per dare al codice l'*input* necessario per avviare i calcoli e il tasto "Chiudi" per far scomparire lo *UseForm* senza che avvenga nessun calcolo.

Nel caso in cui non si selezionasse nessun intervallo temporale e si premesse il comando "Inserisci" il codice darà come unica risposta un messaggio che ci avvisa che nessun intervallo di tempo è stato selezionato.

Per comprendere la logica del modello partiamo dall'interfaccia grafica degli *output* nel foglio di calcolo "CarichiOrari" che sono riportati in una tabella 745x17, graficamente visibile in figura 3.7.

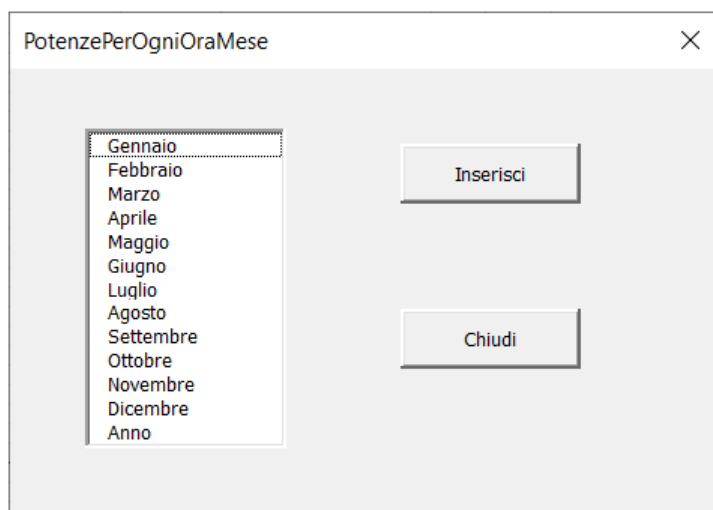


Figura 3.6 *UseForm* in “CarichiOrari”

3.3.2 LAYOUT DEI DATI DI OUTPUT

Nella cella A1 del foglio “CarichiOrari”, una volta che viene eseguito il codice, ci sarà il mese del quale si è misurata la distribuzione dei carichi della nave.

Nella seconda, terza e quarta colonna vengono riportati rispettivamente i giorni del mese, l’ora della giornata e l’ora del mese.

Nella quinta colonna “Navigazione” le sue celle possono essere vuote oppure assumere il valore “Sì”. Questa colonna è stata introdotta per avere un riscontro semplice ed immediato per capire se la nave stia navigando o no, e quindi per poter individuare con semplicità le ore in cui si effettua il cold ironing.

Grazie a questa differenziazione delle condizioni di navigazione si ha una prima suddivisione dell’erogazione di energia dal sistema motore ibrido-rete elettrica. Nel caso della navigazione avremo che il carico della nave potrà essere fornita solo dal motore ibrido, ovvero dal pannello fotovoltaico, motore diesel e dalla batteria, invece nel caso in cui non si stia navigando si ha che i carichi della nave vengono forniti dai pannelli fotovoltaici e/o dalla rete elettrica.

Nella sesta colonna “Località” le celle possono assumere i valori delle località nelle quali la nave transita, ovvero:

- Dalian;
- Dalian – Shanghai;
- Shanghai – Dalian;
- Shanghai;
- Shanghai – Hong Kong;
- Hong Kong – Shanghai;
- Hong Kong;
- Hong Kong – Singapore;
- Singapore – Hong Kong;
- Singapore;
- Singapore – Matara;
- Matara – Singapore;
- Matara;
- Matara – Aden;
- Aden – Matara;
- Aden.

Nella colonna settima “Potenza Richiesta” le celle possono assumere i carichi che la nave può richiedere. Detti carichi, come anticipato, sono riportati in figura 3.2.

Nella ottava colonna “Potenza PV” viene riportata la potenza che i pannelli fotovoltaici sono capaci di produrre in media durante quell’ora. Il valore riportato viene ottenuto a seguito del seguente calcolo:

$$P_{PV} = \text{Irraggiamento}_{\text{medio}} * \text{Superficie}_{PV} * \text{Rendimento}_{PV}$$

Nella nona colonna “Differenza di Potenza” viene riportata la differenza fra il carico della nave e la potenza dei pannelli fotovoltaici. Il valore ottenuto crea una successiva suddivisione seguente al tipo di navigazione. Il segno di questo valore ci dà l’informazione se i pannelli solari possono soddisfare il carico della nave o non sono sufficienti.

$$\Delta P = P_{\text{nave}} - P_{PV}$$

Nel caso in cui la differenza di potenza sia uguale a zero significa che i pannelli riescono a soddisfare tutti i carichi della nave senza attivare nessun’altro componente.

Nel caso in cui la differenza di potenza sia minore di zero significa che si ha un eccesso di potenza prodotta dai pannelli e perciò i pannelli riusciranno a soddisfare i carichi della nave e l’eccesso prodotto dovrà essere usato per altri scopi. In questo caso il valore viene riportato con un *font* verde.

Nel caso in cui la differenza di potenza sia positiva significa che i pannelli non riescono a soddisfare il carico della nave e servirà che il valore ΔP venga fornito in qualche altra maniera. Il valore riportato avrà un *font* rosso.

Nella decima colonna “SOC” si riporta lo stato della carica della batteria (State Of Charge), rappresenta il livello di carica della batteria in percentuale. Quando ha il valore 100 significa che la batteria è carica, e man mano che scende il valore vuol dire che si sta scaricando siccome

sta erogando dell'energia. La batteria non può scaricarsi completamente, ma ha un valore minimo oltre al quale non può scendere, nel nostro caso è stato fissato il valore di 30.

Nella undicesima colonna "Potenza Batteria" è la potenza che la batteria sta erogando o che sta ricevendo. Nel caso in cui stia erogando dell'energia il valore viene riportato con un *font* rosso, mentre nel caso in cui stia assorbendo dell'energia il valore viene riportato con un *font* verde. La potenza della batteria in una determinata ora potrà anche assumere anche il valore nullo.

Nella dodicesima colonna "Potenza persa durante la carica" è un valore non nullo solo nei momenti in cui la batteria è in carica, questo siccome la batteria è caratterizzata da un rendimento di carica. Il rendimento di carica nel nostro modello è stato fissato a 95%. Il valore verrà riportato sempre con il *font* verde.

Nella tredicesima colonna "Potenza MCI" sono riportate le potenze erogate dal motore diesel con un *font* sempre rosso nei momenti di erogazione. Questa potenza sarà sempre nulla nei periodi di *Port-Stay*, mentre durante la navigazione potrà essere nulla o se non nulla significa che il motore sta erogando energia e quindi il suo valore verrà riportato con il font rosso.

Nella quattordicesima colonna "Potenza Rete" si indica la potenza che la rete fornirà quando necessario e solo nei casi in cui ci si trovi in porto. La potenza di rete potrà essere utilizzata per soddisfare i carichi della nave e se necessario a ricaricare la batteria. Nel caso in cui si abbia una differenza di potenza positiva si compensa il valore mancante assorbendo energia elettrica dalla rete e il valore indicato con un *font* rosso, mentre nel caso di differenza di potenza negativa l'energia prodotta in eccesso verrà immessa nella rete elettrica e quindi il valore riportato avrà un *font* verde.

Nella quindicesima colonna "Carico" e nella sedicesima "Rendimento" vengono riportati rispettivamente il carico della nave, ovvero il rapporto fra la potenza della nave e la potenza massima erogabile dal motore diesel, e il rendimento del motore diesel. Questo rapporto può assumere dei valori in un intervallo che va da 0 a 1. A seconda del carico del motore diesel il suo rendimento varierà con una legge che è stata riportata in figura 3.3.

Nella colonna diciassettesima "Potenza in eccesso da PV" viene riportata la potenza in eccesso prodotta dai pannelli fotovoltaici durante il periodo di navigazione. Le condizioni che fanno sì che si verifichi tale casistica sono il periodo di navigazione con una differenza di potenza negativa e con una SOC massima. Quindi la colonna in questione assume un valore non nullo solo nel caso in cui la potenza in eccesso prodotta dai pannelli non riesca a venir immagazzinata all'interno della batteria.

J	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	Mese	Giorni	Ore giornaliere	Ore Mensili	Navigazione	Località	Potenza richiesta	Potenza PV	Differenza di potenza	SOC	Potenza Dalla Batteria	Potenza persa durante la carica della batteria	Potenza MCI	Potenza assorbita dalla rete	Carico [h]	Potenza in eccesso da PV	
2			1	1													
3			2	2													
4			3	3													
5			4	4													
6			5	5													
7			6	6													
8			7	7													
9			8	8													
10			9	9													
11			10	10													
12			11	11													
13			12	12													
14			13	13													
15			14	14													
16			15	15													
17			16	16													
18			17	17													
19			18	18													
20			19	19													
21			20	20													
22			21	21													
23			22	22													
24			23	23													
25			24	24													
26			25	25													
27			26	26													
28			27	27													

Figura 3.7 Foglio “CarichiOrari”

3.3.3 IRRAGGIAMENTO

La potenza P_{pv} erogata dai pannelli fotovoltaici dipende dall'irraggiamento, dalla superficie dei pannelli fotovoltaici e dal rendimento. Gli ultimi due parametri sono noti mentre l'irraggiamento è stato ricavato.

L'irraggiamento è un valore misurato in kW/m^2 . I valori dell'irraggiamento variano in funzione della località e del periodo. I suoi valori sono ricavabili facilmente nelle ore di ormeggio in porto mentre nei periodi di navigazione da un porto ad un altro sono stati approssimati con la seguente formula:

$$i = 1, 2, \dots, (OreNavigazione - 1)$$

$$Irraggiamento_i = \frac{\{Irraggiamento_{1,i} * (OreNavigazione - i)\} + (Irraggiamento_{2,i} * i)}{OreNavigazione}$$

Per $Irraggiamento_{n,i}$ si intende l'irraggiamento che si ha nel porto n all'ora i -esima.

L'irraggiamento nei periodi di navigazione viene ricavata ora per ora secondo una funzione peso che dipende da i . Dove l'indice i rappresenta l'ora di navigazione da quando è stato lasciato il porto 1 di partenza e all'aumentare di esso aumenta il peso dell' $Irraggiamento_{2,i}$.

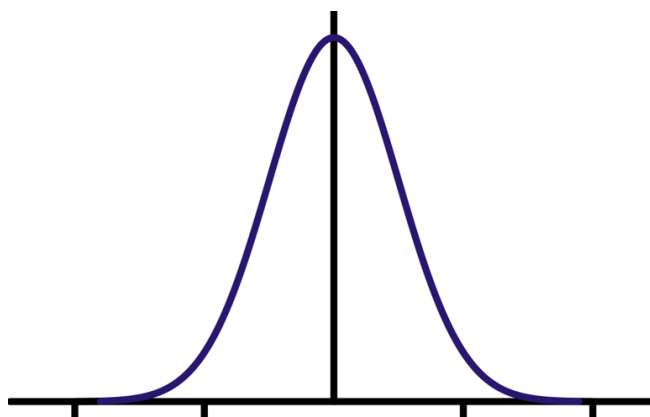


Figura 3.8 Andamento dell'irraggiamento

Per ricavarsi il valore dell'irraggiamento con cui si calcola la potenza prodotta dal pannello fotovoltaico si fa una media. Dato che l'andamento dell'irraggiamento non è costante durante l'intervallo temporale della j -esima ora, che è compreso dalle j^{00} alle j^{59} , ma il valore di irraggiamento j -esimo riportato fa riferimento al suo valore alle ore j^{00} , quindi si introdurrà un errore nel calcolo.

Per ridurre questo errore, si è deciso di introdurre una approssimazione basata sul valore medio, come si può vedere dalla figura 3.9 nel caso in cui calcolassimo la potenza con un irraggiamento all'ora j -esima si introdurrebbe un errore proporzionale all'area (2+3) mentre nel caso dell'approssimazione del valore medio si ha un errore proporzionale all'area (2-1) e quindi si commette un errore più piccolo.

Perciò il valore usato per il calcolo della P_{pv} è:

$$Irraggiamento_{medio,i} = \frac{Irraggiamento_i + Irraggiamento_{i+1}}{2}$$

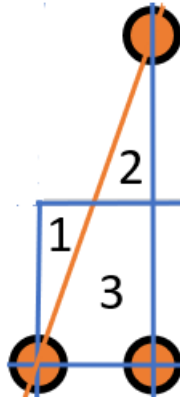


Figura 3.9 Approssimazione nel calcolo dell'irraggiamento

Il valore dell'irraggiamento è riportato nel foglio "Irraggiamento" nel quale sono indicati i valori delle località d'interesse del caso analizzato, ma unicamente nelle ore in cui la petroliera è presente in quella determinata località.

Quando si inserisce il mese nello *UseForm* che si vuole analizzare, le potenze prodotte dai pannelli fotovoltaici per essere calcolate richiamano i valori dell'irraggiamento dal foglio di calcolo omonimo. I valori corretti vengono richiamati secondo la seguente logica:

```

For y = i To LenghtPeriodo + i - 1
  Irraggiamento = Worksheets("Irraggiamento").Cells(y, 17) + Worksheets("Irraggiamento").Cells(y + 1, 17)
  Irraggiamento = Irraggiamento / 2
  PotenzaPV = Irraggiamento * SuperficiePV * (Rendimento / 100)
  If PotenzaPV = 0 Then
    Worksheets("CarichiOrari").Cells(z, ColPV).Font.Color = RGB(0, 0, 0)
  Else
    Worksheets("CarichiOrari").Cells(z, ColPV).Font.Color = RGB(255, 0, 0)
  End If
  Worksheets("CarichiOrari").Cells(z, ColPV) = PotenzaPV
  z = z + 1
Next y

```

Con *i* e *LenghtPeriodo* che vengono determinati in precedenza all'interno del codice in funzione del mese che viene selezionato.

3.3.4 DISTRIBUZIONE DEI CARICHI NEL MOTORE IBRIDO

La distribuzione dei carichi fra i vari componenti è funzione della navigazione, dello stato di carica della batteria, della produzione dai pannelli solari ed infine è legato pure al rendimento del motore diesel.

La prima classificazione avviene in funzione della tipologia di navigazione, in particolare si suddivide in due casistiche, quella di navigazione fra un porto ed un altro, visibile in figura 3.10, e quella di *Port-Stay* che comprende i periodi in cui la nave opera nelle aree portuali, riportata in figura 3.11.

Durante il periodo di navigazione si ha, come intuibile, la potenza dalla rete P_{rete} pari a 0, perciò la potenza richiesta dalla nave dovrà essere soddisfatta fra batteria, pannelli fotovoltaici e motore diesel. Nel modello si è imposto che i pannelli fotovoltaici avranno sempre la priorità rispetto le altre due fonti di energia. I pannelli produrranno una potenza P_{pv} proporzionale all'irraggiamento, perciò durante i periodi di assenza di irraggiamento solare si avrà pure l'assenza di questo contributo. A seconda della grandezza del valore di P_{pv} si potranno verificare tre casistiche, rispettivamente quella in cui la potenza P_{pv} sia maggiore, uguale o minore della potenza della nave P_{nave} .

Partendo dal caso più semplice che è quello nel caso in cui i due valori siano uguali, il risultato è che tutto il carico della nave viene soddisfatto dalla potenza prodotta dai pannelli fotovoltaici. Nel caso in cui ΔP sia negativo il carico della nave viene soddisfatto solamente dai pannelli fotovoltaici, però la produzione in eccesso $|\Delta P|$ si tende a far in modo di non dissiparla, perciò nel modello è presente una istruzione condizionale per vedere se la batteria possa ricevere la potenza $|\Delta P|$.

La possibilità dell'accumulatore a essere ricaricata con una certa potenza consiste in una doppia condizione, la prima sulla SOC che dovrà risultare minore del 100%, la seconda è che la potenza $|\Delta P|$ sia minore o uguale ad un valore di soglia di potenza.

Nel caso in cui la batteria non possa essere ricaricata o che possa essere ricaricata ma usando solamente una quota parte dell'energia che i pannelli possono fornirgli in quell'ora, allora si avrà che la potenza prodotta in eccesso dovrà essere dissipata.

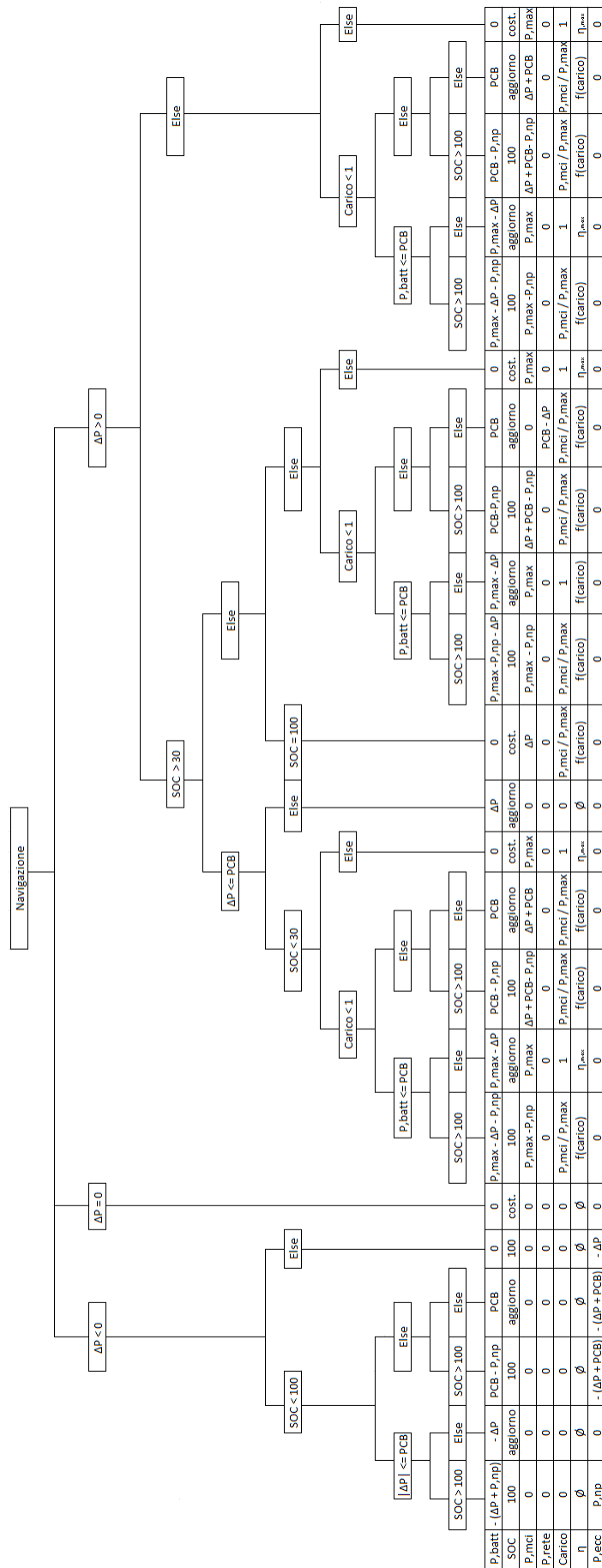


Figura 3.10 Schema ad albero distribuzione dei carichi della nave durante la navigazione

Nell'ultimo caso, ovvero quando ΔP è maggiore di zero, significa che la potenza prodotta dai pannelli non è sufficiente per il soddisfacimento della richiesta della nave, perciò il *gap* dovrà venir colmato da qualche altro componente. Le altre due fonti sono la batteria e il motore diesel, fra i due si è data la priorità alla batteria sia per ragioni ambientali sia perché, come vedremo in seguito, in alcuni casi viene ricaricata dal motore diesel e perciò al suo interno è già presente dell'energia ricavata da processi di combustione.

In questo caso la batteria, come detto, ha la priorità sul motore diesel, però anche nella scarica ha delle limitazioni di utilizzo. Le due condizioni imposte per permetterle di attivarsi sono che la SOC sia maggiore del 30% (che rappresenta la condizione di batteria scarica) e che la potenza da fornire sia inferiore ad una potenza limite di scarica oltre alla quale, per caratteristiche della batteria, non può andare. Inoltre si è fissata una ulteriore condizione legata al fatto che, nel caso in cui non sia sufficiente l'energia residua nella batteria per soddisfare il carico per almeno un'ora, non si attiverà. Questo è dettato dal fatto che il motore diesel dovrà comunque attivarsi dato che la batteria da sola non è capace di soddisfare il rimanente carico della nave. Il motore diesel, essendo attivo, lo si vorrà far operare a carichi maggiori, in accordo con l'andamento crescente del rendimento in funzione del carico riportato in figura 3.3.

Quando si attiva il motore diesel si calcolerà il carico come il rapporto fra la ΔP e la potenza massima erogabile dal motore diesel, nel caso in cui non sia massimo, ovvero nella presenza di una potenza P_{pv} non nulla, si ha impostato una logica di andare a ricaricare la batteria, se possibile.

Nelle condizioni di *Port-Stay*, si è deciso di ipotizzare un'applicazione del cold ironing in ogni porto perciò durante le ore di ormeggio nei porti la potenza erogata dai motori P_{mci} sarà nulla. Anche in questo caso si ha che il pannello fotovoltaico ha la priorità su tutti gli altri sistemi ed a seconda del valore di P_{pv} si avrà un certo segno di ΔP .

Il caso di ΔP nullo è uguale al caso precedentemente descritto.

Nel caso in cui ΔP sia negativo è anch'esso analogo al caso precedente con un'unica differenza nel caso in cui si dissipa l'energia. Al suo posto invece che comportare uno spreco si ha la possibilità di poterla immettere nella rete elettrica generando un utile, economicamente parlando, in funzione del valore di mercato dell'energia elettrica.

Se la ΔP risulta positiva si è imposto che la potenza necessaria venga fornita dalla rete. Se necessario si aumenta la potenza presa dalla rete in modo da ricaricare contemporaneamente la batteria, così da poter salpare da ogni porto con la batteria con una SOC del 100%.

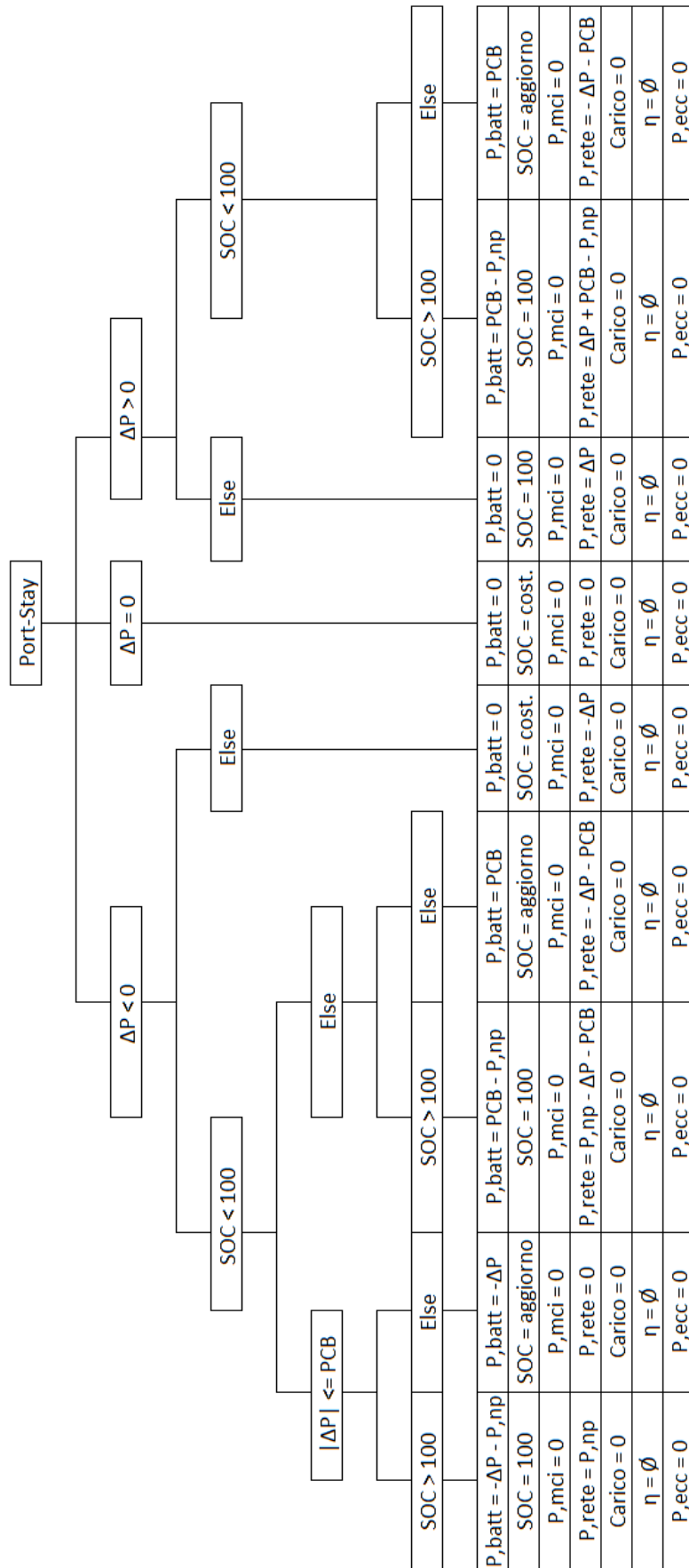


Figura 3.11 Schema ad albero distribuzioni dei carichi in porto

3.3.5 METODI RISOLUTIVI USATI ALL'INTERNO DEL CODICE

Introduciamo per prima cosa la nomenclatura con cui verranno contrassegnate le suddivisioni delle casistiche, si è deciso di contrassegnarle con una successione di numeri in ordine crescente da sinistra verso destra, perciò il nome della condizione $SOC > 30\%$ in figura 3.12 sarà *Condizione1* mentre la sua complementare Else verrà chiamata *Condizione2*.

I nomi delle condizioni successive resteranno fedeli a quelle antecedenti venendo man mano separati da un punto, ovvero il ramo di $SOC > 30\%$ si suddivide in altri due rami che verranno chiamati *Condizione1.1* e *Condizione1.2* e così via.

I problemi che si sono riscontrati durante lo sviluppo del codice sono le fasi di carica e scarica della batteria. Facendo riferimento alla figura 3.10, ovvero nella condizione “navigazione”, andremo ad analizzare tutti i casi in cui la potenza fornita dai pannelli fotovoltaici sia minore rispetto a quella richiesta dalla nave, perciò il ramo $\Delta P > 0$.

Quando ci si trova in queste condizioni, come anticipato nel paragrafo “distribuzione dei carichi nel motore ibrido”, la batteria ha la priorità nei confronti del motore diesel, infatti la prima suddivisione si basa sulla SOC che ci dà due casi, quella della batteria non scarica, ovvero $SOC > 30\%$ e quella di batteria scarica, $SOC = 30\%$. In questa prima suddivisione si richiede in pratica al codice se la batteria possiede dell'energia da erogare.

Continuando nella *Condizione1* la seconda richiesta che si fa al codice è di verificare se la potenza che la batteria dovrebbe erogare sia minore o uguale alla Potenza di Scarica limite della Batteria (PSB). Perciò la *Condizione1.1* ci garantisce che la batteria potrebbe fornire la potenza ΔP , anche se come si vedrà successivamente non sarà sempre così a causa del problema alla scarica della batteria.

Di fatto, la *Condizione1.1* è una condizione sulla potenza, ma noi avendo discretizzato il tempo in ore per attivare la batteria non sono sufficienti le condizioni fatte fino ad ora siccome per potersi attivare la batteria dovrà sì avere energia ($SOC > 30\%$) e la potenza richiesta dovrà essere minore a PSB, ma dovrà anche poterla garantire per tutta l'ora in analisi.

Da questo ragionamento si ha che le condizioni *Condizione1.1.1* e *Condizione1.1.2* verificano se la SOC sia scesa al di sotto della condizione di batteria scarica ($SOC < 30\%$), in particolare la *Condizione1.1.2* ci dà il caso in cui la SOC non scenderebbe al di sotto del 30%, perciò rappresenta il caso in cui la potenza P_{batt} sia ΔP ed invece la SOC venga aggiornata a seconda di quanta energia erogherà durante quell'ora. I valori della *Condizione1.1.2* sono riportati nella sesta colonna da sinistra della figura 3.12.

Nel caso in cui si verifichi la *Condizione1.1.1* significa che la batteria non è in grado di soddisfare il carico della nave per la durata di un'ora, di conseguenza dovrà attivarsi il motore diesel. Una volta attivato il motore diesel la batteria non erogherà energia, anzi si vorrà che il motore diesel operi con carichi più alti possibili, facendolo così lavorare ad un rendimento maggiore. Si potrà aumentare il carico solo nel caso in cui la potenza erogata in eccesso dal motore possa venir immagazzinata nella batteria.

Nella suddivisione successiva si verifica quale sia il carico del motore, in particolare la *Condizione1.1.1.2* è verificata se il carico del motore è 1 e quindi nella condizione in cui sta già lavorando a carico massimo, di conseguenza non sarà in grado di aumentare ulteriormente il suo carico per poter ricaricare la batteria. I valori della *Condizione1.1.1.2* sono riportati nella quinta colonna da sinistra della figura 3.12.

La condizione complementare *Condizione1.1.1.1* rappresentata da un carico < 1 , indica il caso in cui la potenza del motore, che viene posta uguale a ΔP , non sia uguale alla potenza massima P_{max} .

Quando verificata la *Condizione1.1.1.1* si pone che il carico sia unitario e che la P_{batt} sia pari a quanto il carico è stato aumentato, ovvero $P_{max} - \Delta P$.

La suddivisione seguente alla *Condizione1.1.1.1* è una analoga ad un'altra fatta in precedenza. La batteria, come nel caso di scarica, ha dei limiti anche nella fase di carica, perciò bisogna verificare che la P_{batt} non sia maggiore della Potenza di Carica limite della Batteria (PCB).

La *Condizione1.1.1.1.1* ($P_{batt} \leq PCB$) verifica proprio che sia rispettato questo limite di carica, in seguito ad esso bisognerà verificare che la batteria non superi il valore di 100% della SOC. La *Condizione1.1.1.1.2* è il caso in cui la SOC a seguito di una ricarica di un'ora non abbia superato il valore di 100%. I valori del ramo relativo alla *Condizione1.1.1.1.2* sono riportati nella seconda colonna da sinistra della figura 3.12.

Nella *Condizione1.1.1.1.1* (SOC $> 100\%$) invece si ha che la potenza attualmente assegnata alla batteria, ovvero $P_{max} - \Delta P$, sia eccessiva. Perciò la P_{batt} verrà ridotta di una quantità P_{np} per ottenere alla fine dell'ora una SOC del 100%. I valori del ramo relativo alla *Condizione1.1.1.1.1* sono riportate nella prima colonna da sinistra della figura 3.12.

La *Condizione1.1.1.1.2*, ovvero quella complementare della *Condizione1.1.1.1.1*, modifica il valore di P_{batt} da $P_{max} - \Delta P$ a PCB, questo siccome il motore sarebbe capace di ricaricare la batteria, ma la batteria stessa non è capace di ricevere tale potenza a causa di limitazioni elettriche intrinseche dell'accumulatore. A seguito dell'aggiornamento della potenza con cui viene ricaricata la batteria bisogna adeguare anche la potenza del motore. La P_{mci} varia da P_{max} a $\Delta P + PCB$. In seguito alla modifica legata alla potenza che può ricevere la batteria bisogna vedere se la batteria sia in grado di ricevere questa potenza senza oltrepassare il 100%, da qui le successive due condizioni *Condizione1.1.1.1.2.1* e *Condizione1.1.1.1.2.2* che rappresentano rispettivamente il caso SOC $> 100\%$ e quello complementare. Nella *Condizione1.1.1.1.2.1* la P_{batt} e la P_{mci} vengono ridotte entrambe di una quantità P_{np} mentre nella *Condizione1.1.1.1.2.2* i valori restano inalterati. Tutti i valori della *Condizione1.1.1.1.2.1* e della *Condizione1.1.1.1.2.2* sono riportati rispettivamente nella terza e nella quarta colonna della figura 3.12.

Ripercorrendo lo schema ad albero a ritroso fino alla Condizione 1, in seguito si descriveranno le condizioni successive alla *Condizione1.2*.

La *Condizione1.2* si verifica nel caso in cui la potenza richiesta da erogare alla batteria sia maggiore della PSB e quindi che sia incapace di colmare il *gap* fra il carico della nave e la potenza prodotta dai pannelli fotovoltaici rendendo dunque necessaria l'attivazione del motore. Assumendo il fatto che d'ora in poi il motore sarà operativo, si può suddividere la *Condizione1.2* nella *Condizione1.2.1* e nella *Condizione1.2.2* che rappresentano rispettivamente la condizione di batteria carica e quella di batteria non completamente carica. Nella *Condizione1.2.1* (SOC = 100%) il carico del motore, che è stato posto pari a ΔP , non potrà essere in nessun caso ulteriormente aumentato. I suoi valori sono riportati nella settima colonna della figura 3.12.

Nella *Condizione1.2.2* essendo la SOC diversa dal 100% la P_{mci} verrà incrementata, se possibile, per ricaricare la batteria.

Verificato che la batteria possa ricevere bisogna anche verificare se il motore, che già deve soddisfare parte del carico della nave, possa erogare dell'ulteriore potenza. Perciò si fa una verifica sul carico del motore, la quale ci darà la *Condizione1.2.2.1* e la *Condizione1.2.2.2*.

La *Condizione1.2.2.2* è la condizione nel caso in cui il carico del motore sia 1 e perciò rappresenta l'impossibilità del motore di ricaricare la batteria. I valori delle potenze nella *Condizione1.2.2.2* sono riportati nella dodicesima colonna di figura 3.12.

La *Condizione1.2.2.1* rappresenta quella in cui il motore sarebbe capace di aumentare il suo carico per poter ricaricare la batteria. In questa configurazione si aumenta la P_{mci} a P_{max} e si pone la P_{batt} pari a $P_{max} - \Delta P$.

Fissata la potenza che potrebbe ricevere la batteria bisogna verificare che la batteria la possa ricevere e quindi si pone una prima condizione che ci dà le due possibili configurazioni quella che la P_{batt} non sia maggiore di PCB, rappresentata dalla *Condizione1.2.2.1.1*, e quella invece che sia maggiore di PCB rappresentata dalla *Condizione1.2.2.1.2*.

La *Condizione1.2.2.1.1* viene successivamente suddivisa in altri due rami andando a verificare la SOC. Nella *Condizione1.2.2.1.1.1* di $SOC > 100\%$, bisogna ridurre la P_{mci} e P_{batt} siccome la batteria verrebbe ricaricata di più del possibile, mentre la *Condizione1.2.2.1.1.2* ($SOC \leq 100\%$) è la condizione nella quale i valori restano inalterati. I valori della *Condizione1.2.2.1.1.1* e della *Condizione1.2.2.1.1.2* sono riportati rispettivamente nella ottava e nona colonna della figura 3.12.

Nella *Condizione1.2.2.1.2* la P_{mci} e la P_{batt} vengono diminuite rispettivamente ai valori di $\Delta P + PCB$ e di PCB, questo a causa della limitazione, già introdotta precedentemente, della batteria nell'essere ricaricata. Una volta aggiornati i valori bisogna verificare che siano coerenti con la SOC e quindi verificare che non si superi il valore di 100%. La *Condizione1.2.2.1.2.2* è la condizione nella quale la SOC non supera il 100%, mentre la *Condizione1.2.2.1.2.1* è quella in cui la SOC supererebbe il 100% se la batteria venisse ricaricata per un'ora alla potenza di PCB, perciò si dovranno ulteriormente ridurre entrambi i valori di P_{batt} e P_{mci} di un valore P_{np} . I valori della *Condizione1.2.2.1.2.1* e della *Condizione1.2.2.1.2.2* sono riportate rispettivamente nella decima e undicesima colonna della figura 3.12.

Ritornando al primo bivio, e quindi alla condizione che verificava se la batteria fosse capace di erogare dell'energia, e proseguiamo questa volta lungo il ramo della *Condizione2*, che si verifica quando la batteria è completamente scarica.

Siccome la batteria presenta una SOC del 30% non potrà erogare nessuna potenza ed in nessun caso, perciò la potenza residua richiesta dalla nave che non è stata soddisfatta dai pannelli dovrà venire erogata dal motore. Per le ragioni precedentemente introdotte si vuole che il carico del motore sia più alto possibile, perciò per prima cosa si verifica in che condizioni siamo. La P_{mci} la si pone pari a ΔP e si misura il carico. La *Condizione2* si suddivide nella *Condizione2.1* e *Condizione2.2* che rispettivamente rappresentano il caso in cui il carico sia minore di 1 o uguale a 1. Nel primo caso perciò il motore sarebbe capace di ricaricare la batteria aumentando il suo carico, mentre nel secondo caso non è possibile. I valori delle potenze nelle *Condizioni2.2* sono riportati nella diciassettesima colonna.

A seguito che si verifichi la *Condizione2.1* si pone che la P_{mci} sia massima, implicando così un carico unitario, però come in ogni fase di carica della batteria bisogna far sì che rispetti la condizione sulla potenza di carica limite e la condizione sulla SOC.

La prima condizione ad essere imposta è la condizione sulla potenza con la *Condizione2.1.1* e la *Condizione2.1.2* che si verificano quando la P_{batt} , che è stata fissata dalla differenza fra P_{max} e ΔP , sia minore o al massimo uguale di PCB e quando, invece, sia maggiore di PCB.

A seguito della condizione sulla potenza si fissa per entrambi i casi la condizione sul limite della SOC, ovvero che non può superare il 100%. I valori delle potenze della

Condizione 2.1.1.1, della Condizione 2.1.1.2, della Condizione 2.1.2.1 e della Condizione 2.1.2.2 sono riportate rispettivamente nella tredicesima, nella quattordicesima, nella quindicesima e nella sedicesima colonna di figura 3.12.

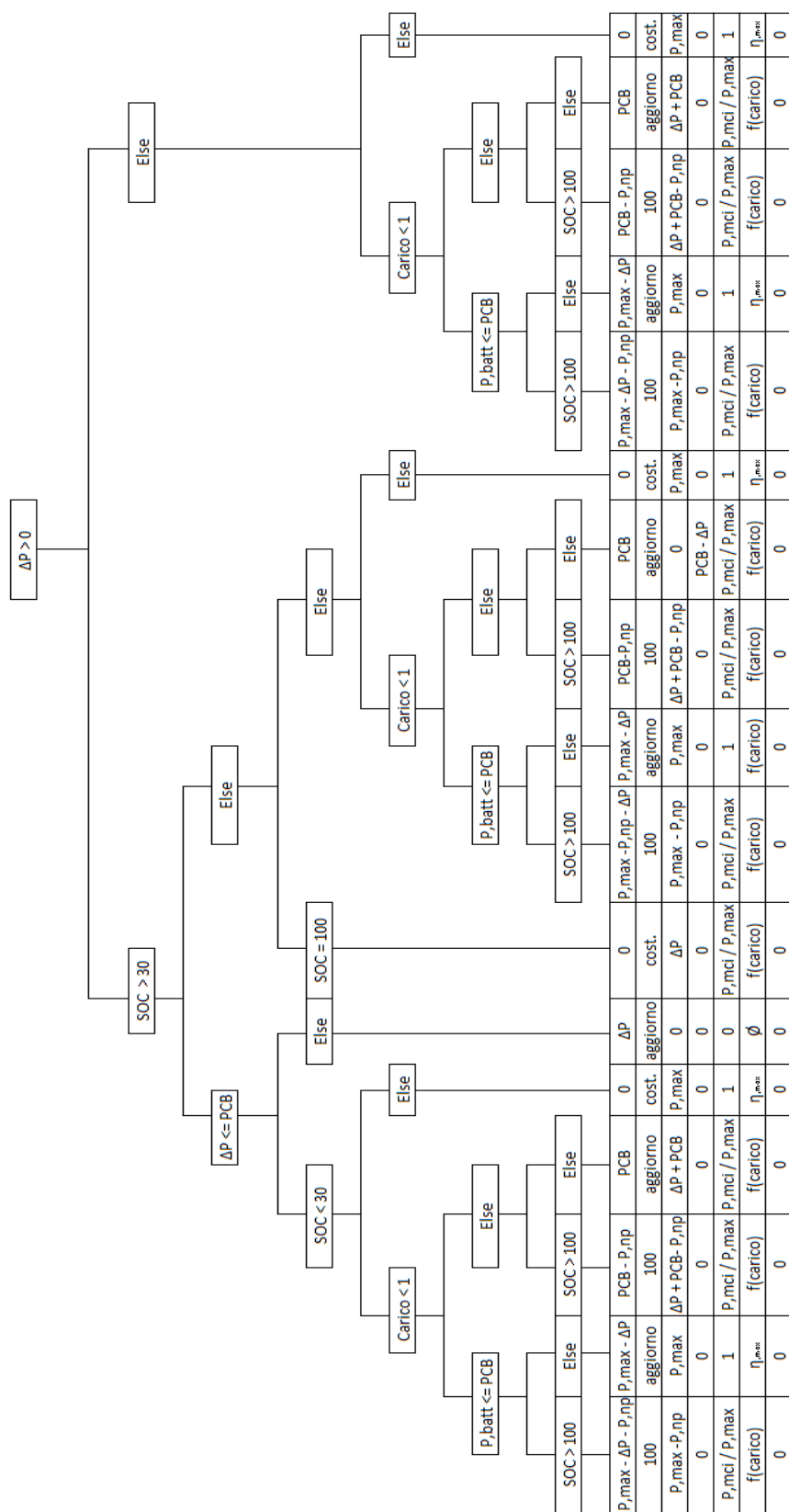


Figura 3.12 Schema ad albero durante la navigazione con $P_{nave} > P_{pv}$

3.3.6 PROBLEMA DELLA CARICA DELLA BATTERIA: aggiornamento della SOC

Nella fase di carica della batteria bisogna aggiornare il valore a seconda dell'energia assorbita, che la si ottiene in funzione della potenza di carica e per la durata dell'intervallo temporale, che nel nostro caso è di un'ora.

I dati noti per misurare i valori aggiornati delle potenze e della SOC durante le fasi di carica sono la potenza della batteria P_{batt} , il valore di SOC di partenza e l'energia totale della batteria, inteso nel senso di quella che ha la batteria nel momento in cui è completamente carica.

Per prima cosa bisogna calcolare, in funzione della SOC, l'energia residua nella batteria e in seguito calcolare l'energia che si potrebbe accumulare in un'ora con la potenza impostata. La somma di questi due valori è l'energia che teoricamente possiederà la batteria e dalla quale possiamo misurare la nuova SOC. Perciò analiticamente:

$$\begin{aligned} \text{EnergiaResidua} &= \text{SOC} * \text{EnergiaTotaleBatteria} / 100 \\ \text{EnergiaAccumulata} &= \text{PotenzaBatteria} * 3600 \\ \text{EnergiaResidua} &= \text{EnergiaResidua} + \text{EnergiaAccumulata} \\ \text{SOC} &= (\text{EnergiaResidua} / \text{EnergiaTotaleBatteria}) * 100 \end{aligned}$$

Nel caso in cui il valore di SOC superi il 100%, ovvero dopo aver svolto i calcoli appena riportati, bisogna fare il ragionamento a ritroso. Siccome si ha avuto una SOC maggiore del valore massimo l'energia fornita ad essa dovrà essere diminuita e ciò significa ridurre la potenza con cui viene ricaricata. Analiticamente:

$$\begin{aligned} \text{EnergiaNonPresa} &= (\text{SOC} - 100) * \text{EnergiaTotaleBatteria} / 100 \\ \text{PotenzaNonPresa} &= \text{EnergiaNonPresa} / 3600 \\ \text{PotenzaMCI} &= \text{PotenzaMCI} - \text{PotenzaNonPresa} \\ \text{PotenzaBatteria} &= \text{PotenzaBatteria} - \text{PotenzaNonPresa} \\ \text{SOC} &= 100 \end{aligned}$$

È da specificare che nella realtà non potrà succedere che la batteria superi il 100%, ma nel codice succede a causa di come è stata impostata la sua logica.

Il problema alla base di questo meccanismo è la discretizzazione del tempo, ovvero dato che in un intervallo di tempo non potremmo avere due valori di potenza differenti, per esempio se si ricarica alla potenza di carica limite per metà dell'intervallo mentre nell'altra metà non la si ricarica proprio siccome già completamente carica. Perciò con gli ultimi passaggi riportati si va a correggere i valori che vorremmo fornire dal motore per ragioni di rendimento e quindi di consumo di combustibile e dei suoi costi, ma bisogna trovare il valore tale per cui si arrivi al valore di 100% al termine dell'intervallo temporale, avendo durante ogni istante dell'intervallo un valore costante di potenza.

3.3.7 BILANCIO ENERGETICO: cenni sulle approssimazioni introdotte

Per controllare la validità dei risultati ottenuti bisogna confrontare il valore approssimato \tilde{o}_i , ovvero il valore ottenuto dal modello costruito, con il valore effettivo $o_{eff,i}$ che rappresenta l'obiettivo che si vuole ottenere. La validità dei valori approssimati è data dalla loro vicinanza nei confronti del valore effettivo. Nel nostro caso il valore effettivo è rappresentato dalla richiesta della nave mentre il valore approssimato è rappresentato dalle potenze erogate dal motore ibrido atte al soddisfacimento del carico della nave.

Per misurare la vicinanza useremo la norma 1, anche nota come norma Manhattan, che viene definita come:

$$\|o\|_1 = \sum_i^N |o_i|$$

Con:

- N: numero di ore dell'intervallo temporale (ore, giorni, settimane o il mese);
- o_i : il valore è la differenza fra il valore approssimato e quello effettivo, che anche rappresenta il bilancio energetico orario.

$$o_i = \tilde{o}_i - o_{eff,i}$$

Gli errori misurati in "BilancioEnergetico" sono l'errore assoluto e l'errore relativo che sono stati calcolati per ogni ora, giorno, settimana ed infine per tutto il mese.

L'errore assoluto orario *i-esimo* viene posto pari al valore assoluto di o_i , ovvero:

$$ErrAss_i = |\tilde{o}_i - o_{eff,i}| = |o_i|$$

L'errore relativo orario *i-esimo* viene misurato dal rapporto dell'errore assoluto orario *i-esimo* ed il valore assoluto del valore effettivo, analiticamente:

$$ErrRel_i = \frac{|\tilde{o}_i - o_{eff,i}|}{|o_{eff,i}|} = \frac{|o_i|}{|o_{eff,i}|}$$

Per misurare i casi diversi da quello orario ci si rifà nuovamente alla definizione della norma 1 e si avranno N valori sommati, con un diverso N a seconda del periodo temporale analizzato. In particolare l'errore assoluto sarà dato esattamente dalla definizione della norma 1 mentre l'errore relativo sarà il rapporto dell'errore assoluto e della norma dei valori effettivi.

$$ErrRel = \frac{\sum_i^N |\tilde{o}_i - o_{eff,i}|}{\sum_i^N |o_{eff,i}|} = \frac{\|ErrAss\|_1}{\|o_{eff}\|_1}$$

Nel foglio nominato "BilancioEnergetico" si possono calcolare, a seguito del calcolo della distribuzione dei carichi all'interno del motore, gli errori che il codice commette.

Il Foglio “BilancioEnergetico” presenta una tabella 745x9, dove nelle righe son riportate le ore del mese mentre nelle colonne vengono riportati da sinistra verso destra:

- il bilancio energetico orario;
- l'errore assoluto orario;
- l'errore assoluto giornaliero;
- l'errore assoluto settimanale;
- l'errore assoluto mensile;
- l'errore relativo percentuale orario;
- l'errore relativo percentuale giornaliero;
- l'errore relativo percentuale settimanale;
- l'errore relativo percentuale mensile.

Per riempire la tabella dai valori aggiornati bisogna premere il comando “CALCOLA ERRORI” riportato in figura 3.13 mentre per ripulire la tabella si è inserito un secondo comando nominato “PULISCI”.

I valori con maggiore importanza che appaiono sono gli errori relativi, infatti solo per questi si è imposto che nel caso in cui superino un valore di 0,0001 di errore relativo percentuale la cella assuma uno sfondo rosso così da essere più facilmente individuabile.

Il comando per pulire le celle è da usare fra un calcolo degli errori e l'altro, ma categoricamente solo nel caso in cui nell'ultimo calcolo degli errori si siano riscontrati dei valori maggiori alle grandezze limite imposte.

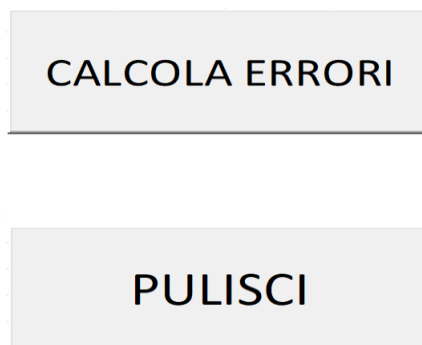


Figura 3.13 Comandi nel Foglio “BilancioEnergetico”

3.3.8 RISULTATI DEL MODELLO NELLE CONDIZIONI STANDARD

Nel seguente paragrafo si analizzeranno i risultati con il codice sviluppato, non si riporteranno i risultati di tutti i mesi ma saranno riportati i risultati unicamente di alcuni mesi campione, inoltre verranno descritte le distribuzioni dei carichi all'interno del motore.

I mesi presi in analisi sono quattro, uno per ogni stagione. Questi mesi sono gennaio, aprile, luglio e ottobre.

Per riportare i risultati ottenuti si sono usati dei grafici ad aree, i grafici di maggior interesse sono quelli della potenza richiesta della nave e quelli delle potenze erogate per il soddisfacimento della richiesta della nave dal motore ibrido. In questo secondo grafico vengono riportate solamente le potenze che hanno come destinatario la nave.

I grafici hanno nelle ascisse le ore del mese mentre nelle ordinate le potenze riportate in kW.

Nel caso standard i valori caratteristici sono:

- Superficie PV: 2.000 m²;
- Rendimento PV: 17%;
- Capacità batteria: 2.600 kWh;
- Potenza limite di carica: 800 kW;
- Potenza limite di scarica della batteria: 1.700 kW;
- Rendimento di carica della batteria: 95%;
- Rendimento di scarica della batteria: 100%;
- Potenza massima del motore diesel: 1.790 kW.

3.3.8.1 IL FOGLIO “Bilancio”

I grafici non potrebbero essere realizzati dai valori che vengono riportati nel foglio “CarichiOrari” siccome riportano i valori complessivi ed inoltre non indicano a chi viene fornita la potenza, perciò è risultato necessario introdurre un foglio che ci permetta di riportare i singoli valori e con indicato il destinatario ed il mittente.

Nel foglio “Bilancio” si ha la compilazione di una tabella ogni volta che viene premuto il comando “Inserisci” nello *UseForm* “PotenzePerOgniOraMese”. La tabella che si compila è composta da 744 righe che ci rappresentano le ore del mese e una serie di colonne. Le colonne sono raggruppate in gruppi che indicano l'elemento comune di essi, ovvero i soggetti.

I soggetti sono i pannelli fotovoltaici, la batteria, il motore diesel, la rete e la nave.

Ogni soggetto si suddivide in delle sotto-colonne che sono:

- PV:
 - Potenza PV a Nave;
 - Potenza PV a Batteria;
 - Potenza PV a Rete;
 - Potenza PV in Eccesso.
- BATTERIA:
 - Potenza Batteria da PV;
 - Potenza Batteria da MCI;
 - Potenza Batteria da Rete;
 - Potenza Batteria a Nave;
 - Potenza Persa nella Carica.
- MCI:
 - Potenza MCI a Nave;
 - Potenza MCI a Batteria.
- RETE:
 - Potenza Rete a Nave;
 - Potenza Rete a Batteria;
 - Potenza Rete da PV.
- NAVE:
 - Potenza Nave;
 - Potenza da PV;
 - Potenza da Batteria;
 - Potenza da MCI;
 - Potenza da Rete.

I grafici di maggior interesse sono il grafico che riporta la “Potenza Nave” e quello che riporta tutte le altre voci del soggetto “NAVE”. I due grafici dovranno risultare uguali a meno di errori trascurabili.

3.3.8.2 GENNAIO

Il mese di gennaio ha come porto di partenza Dalian in Cina e come arrivo Aden in Yemen. Il tragitto è caratterizzato da una grande variabilità dei valori di irraggiamento, in particolare si ha il valore di picco dell’irraggiamento in Dalian di $0,41 \text{ kW/m}^2$ mentre il valore di picco quando la petroliera è ormeggiata a Aden è di $0,88 \text{ kW/m}^2$. Questa variabilità è dovuta al fatto che a Aden è estate, dato che è situata nell’emisfero australe. Al contrario, Dalian ha un valore basso d’irraggiamento siccome è inverno trovandosi nell’emisfero boreale.

Nella figura 3.14 e 3.15 sono riportati i valori riguardanti ai carichi della nave, come si può notare sono uguali a meno di un errore orario di $\pm 7,24792\text{E-}05 \text{ kW}$, ovvero si compie un errore in un’ora minore del decimo di Watt. Nell’arco temporale di tutto il mese di gennaio si compie invece un errore assoluto di $\pm 0,00833160 \text{ kW}$.

Gli errori relativi orari sono inferiori a $1,25885\text{E-}05$, mentre nel mese si compie un errore relativo di $8,944\text{E-}07$.

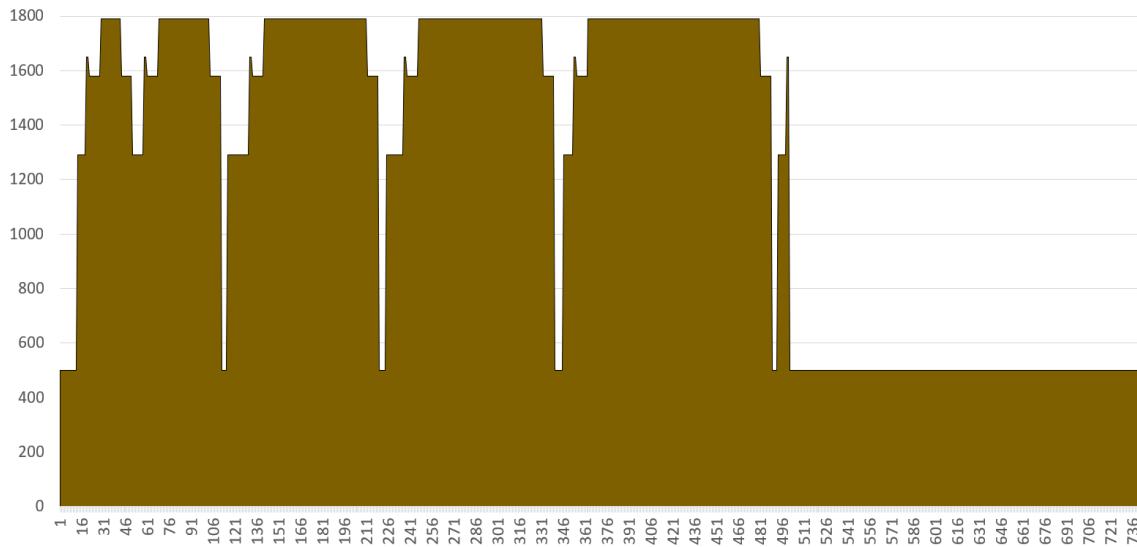


Figura 3.14 Richiesta della nave nel mese di gennaio [kW - ore]

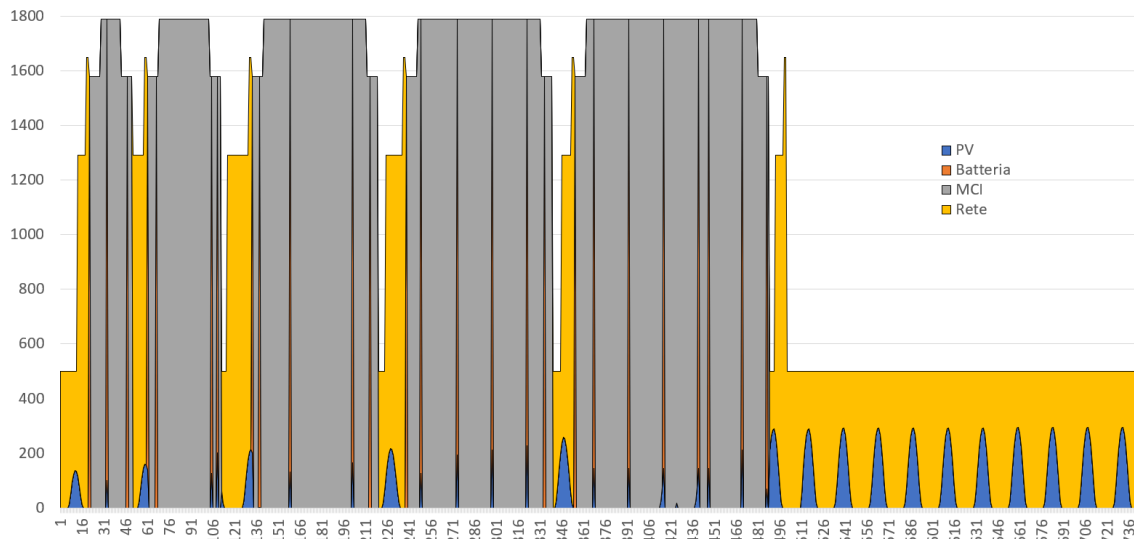


Figura 3.15 Potenza erogata dal motore ibrido e dalla rete nel mese di gennaio [kW -ore]

Analizzando i risultati ottenuti in 3.15 si vede che la tendenza generale è che la nave soddisfa le sue richieste attraverso il motore durante i periodi di moto mentre usa la rete nei momenti di stazionamento in porto con l'ausilio dei pannelli fotovoltaici. Al funzionamento del motore diesel si alterna la scarica della batteria, che però è in grado di soddisfare le richieste solo per un'ora con la capacità impostagli. Si noti inoltre che la tendenza dell'energia prodotta dai pannelli fotovoltaici durante il moto è quella di ricaricare la batteria, considerazione alla quale si può arrivare dal fatto che per la maggior parte delle ore durante la navigazione non è presente come contributo o, più facilmente dalle figure 3.17 e 3.18.

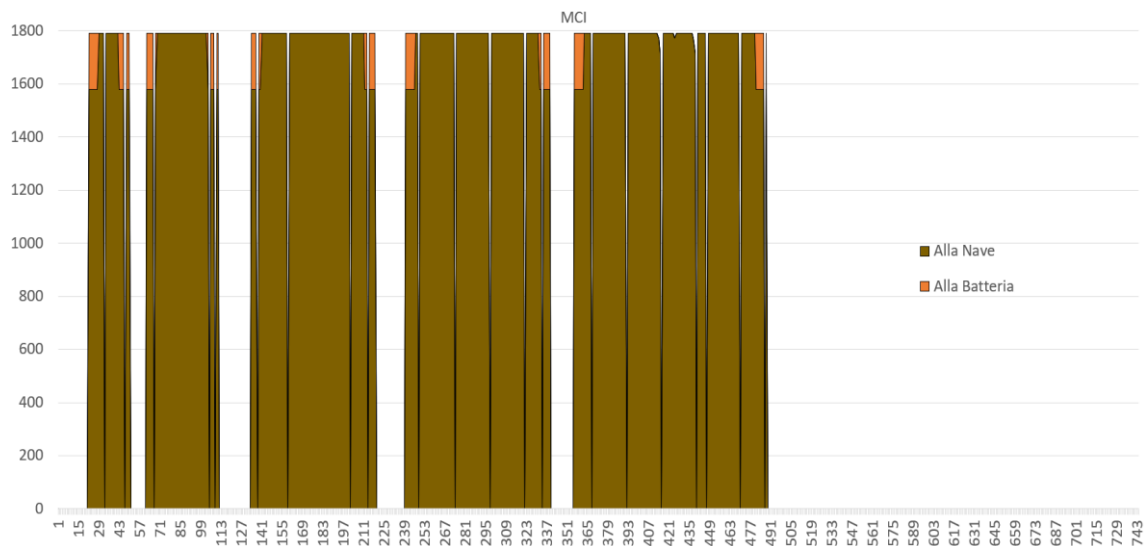


Figura 3.16 Potenza erogata dal motore diesel nel mese di gennaio [kW – ore]

La potenza del motore diesel prodotta può avere due destinatari, come si può vedere dalla legenda della figura 3.16, che sono la nave e la batteria. La carica della batteria avviene in pochi casi siccome si è imposto, nel nostro caso standard, che le ore di navigazione regolare sono solamente 16 per ogni tratta. Quindi solamente in queste poche ore il motore è capace di aumentare il suo carico per ricaricare la batteria.

Nella realtà la nave non richiederà sempre il carico massimo, ma ci saranno delle riduzioni e perciò il contributo del motore per la ricarica della batteria sarà molto maggiore rispetto al caso standard che stiamo trattando.

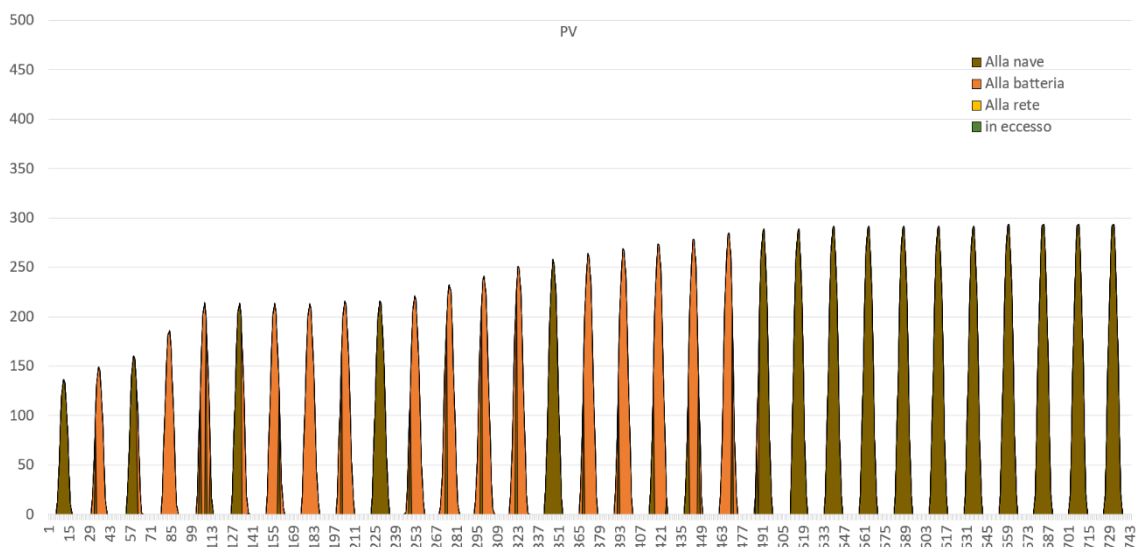


Figura 3.17 Potenza erogata dai pannelli fotovoltaici nel mese di gennaio [kW – ore]

Dalla legenda della figura 3.17 si può vedere che la potenza prodotta dai pannelli fotovoltaici può avere quattro destinazioni. In queste condizioni si vede che le ultime due, ovvero quelle che sono presenti quando i pannelli fotovoltaici producono un eccesso rispetto la potenza richiesta dalla nave, non si verificano. I pannelli però contribuiscono, come anticipato, alla ricarica della batteria durante la navigazione siccome ai motori è quasi sempre impossibile aumentare il carico dato che lavorano già a carico unitario, mentre durante l'ormeggio in porto erogano energia per soddisfare le richieste della nave e ridurre l'energia presa dalla rete, fenomeno visibile anche in figura 3.19.

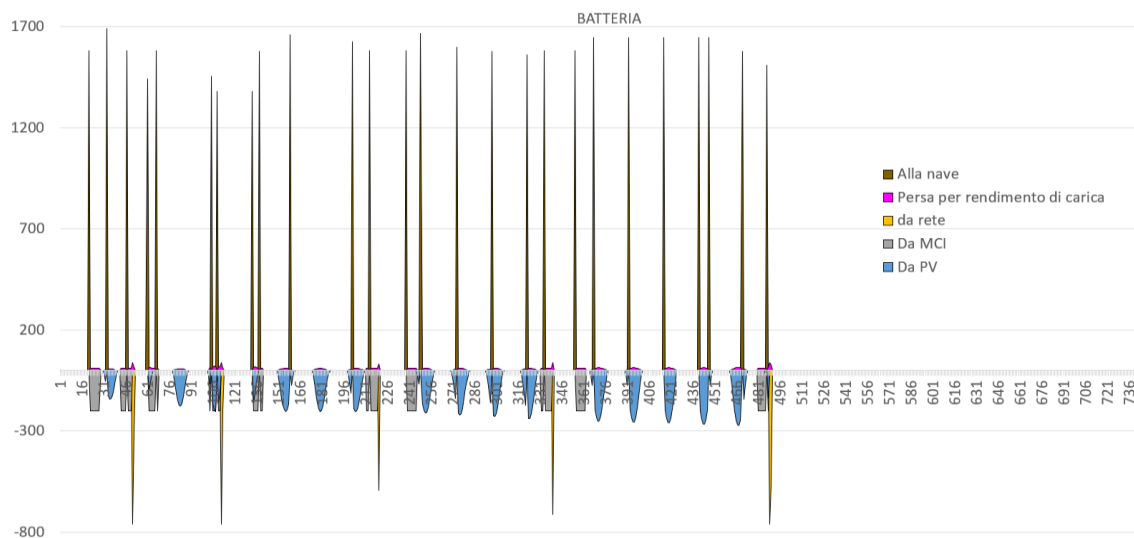


Figura 3.18 Potenza scambiata dalla batteria nel mese di gennaio [kW – ore]

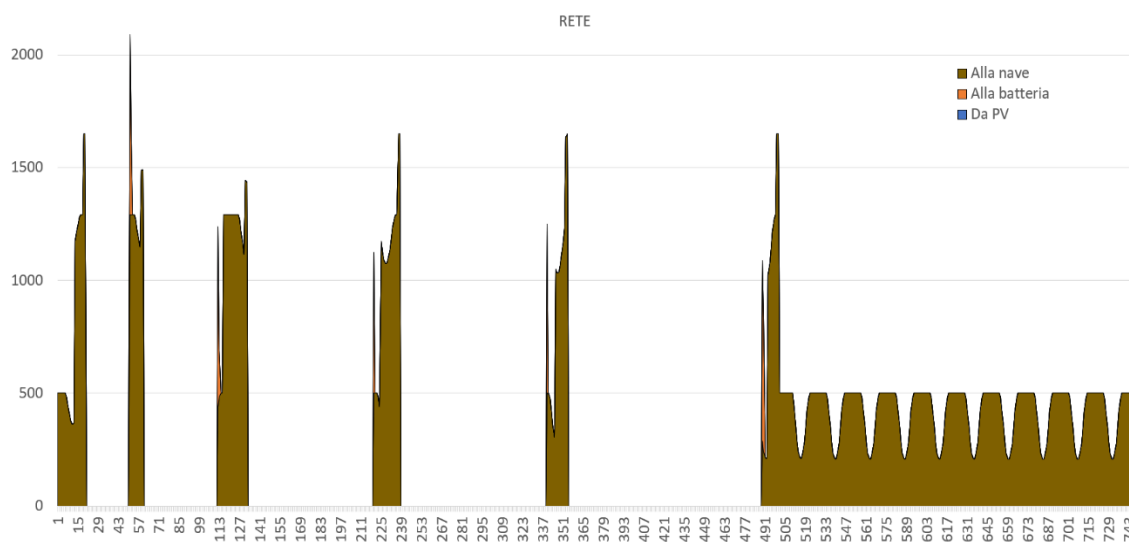


Figura 3.19 Potenza erogata dalla rete nel mese di gennaio [kW – ore]

Dalla figura 3.19 si può inoltre osservare che nella prima ora di ogni allacciamento alla rete si ha un picco di energia fornita, questo è dovuto alla energia assorbita per ricaricare la batteria.

3.3.8.3 APRILE

Il tragitto di aprile ha come luogo di partenza Aden e come arrivo Dalian.

Il tragitto è caratterizzato da una variabilità dell'irraggiamento a causa della variazione delle località in cui si trova l'imbarcazione, in particolare abbiamo che i pannelli solari a Aden sono soggetti, nell'ora con maggiore intensità, ad un irraggiamento di $0,97 \text{ kW/m}^2$, mentre a Dalian di $0,76 \text{ kW/m}^2$. L'andamento dell'irraggiamento coincide con l'andamento della potenza prodotta dai pannelli fotovoltaici siccome i valori sono proporzionali fra loro, vedi figura 3.20. Si può notare dalla figura 3.20 una maggiore uniformità dei valori di picco lungo tutto il tragitto della nave. Anche in queste condizioni non si ha un eccesso di produzione in nessuna ora del mese, perciò le voci di "Alla rete" e "In eccesso" non compaiono.

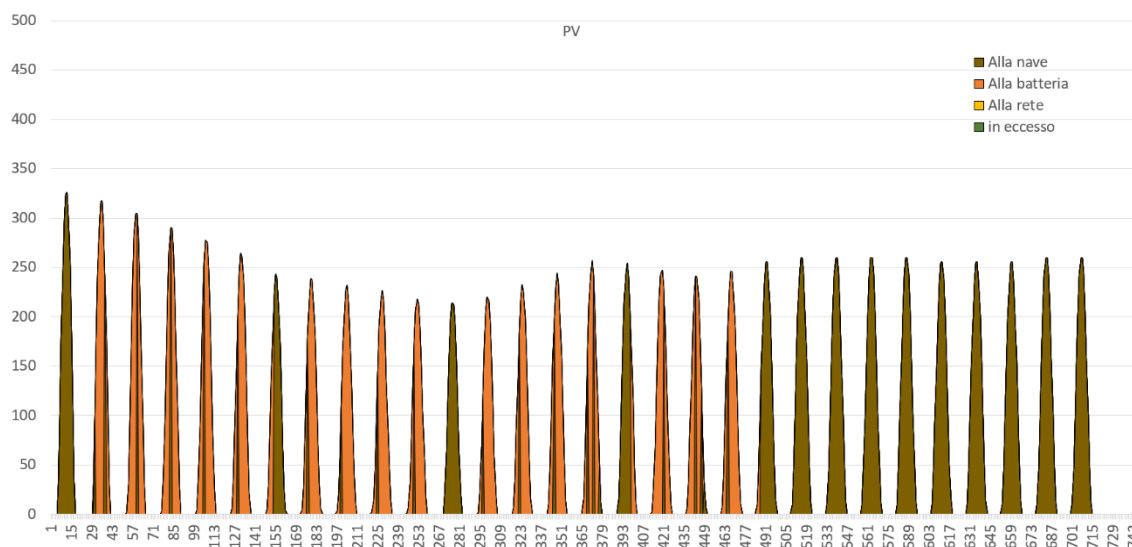


Figura 3.20 Potenza erogata dai pannelli fotovoltaici nel mese di aprile [kW – ore]

L'andamento orario della richiesta di energia e di quella erogata sono riportate rispettivamente nelle figure 3.21 e 3.22. Questi due andamenti combaciano a meno di un errore assoluto orario di $\pm 7,34329\text{E-}05$, mentre su tutto il mese si compie un errore assoluto di $\pm 0,00901635 \text{ kW}$. L'errore relativo che si compie su ogni ora è minore di $1,2207\text{E-}05$, mentre l'errore relativo su tutto il mese è di $9,80539\text{E-}07$.

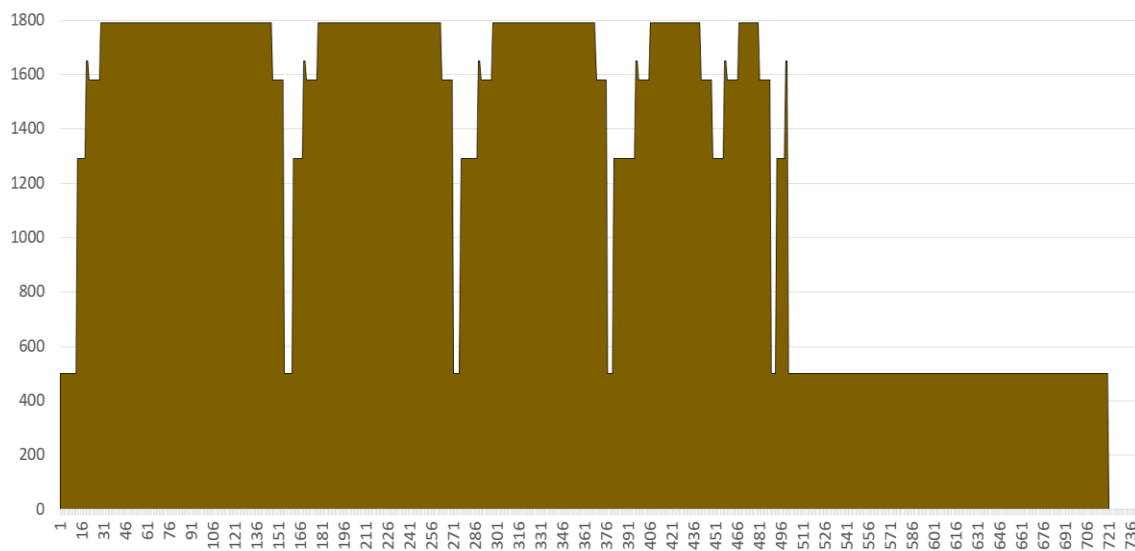


Figura 3.21 Richiesta della nave nel mese di aprile [kW - ore]

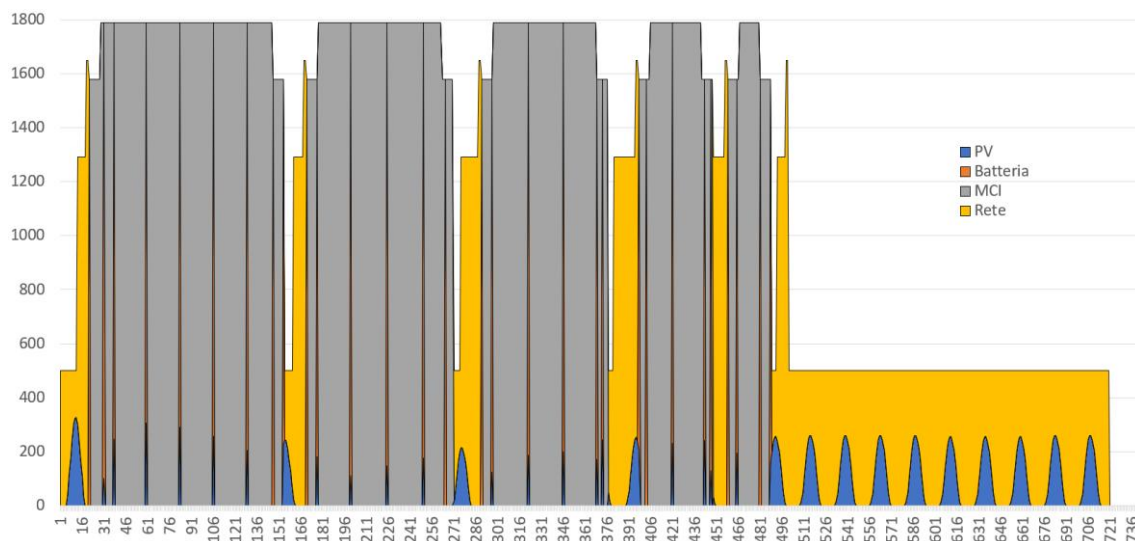


Figura 3.22 Potenza erogata dal motore ibrido e dalla rete nel mese di aprile [kW - ore]

Le considerazioni fatte sui contributi dei singoli sistemi energetici sono ancora valide anche nel mese di aprile ed inoltre è valida pure la limitazione del motore nella fase di ricarica della batteria.

Ciò che va osservato nel mese di aprile è che la batteria aumenta il suo contributo nella fase di erogazione di energia atta al soddisfacimento del carico richiesto dalla nave. Il numero delle ore in cui è in funzione passa da un valore di 26 del mese di gennaio a 30.

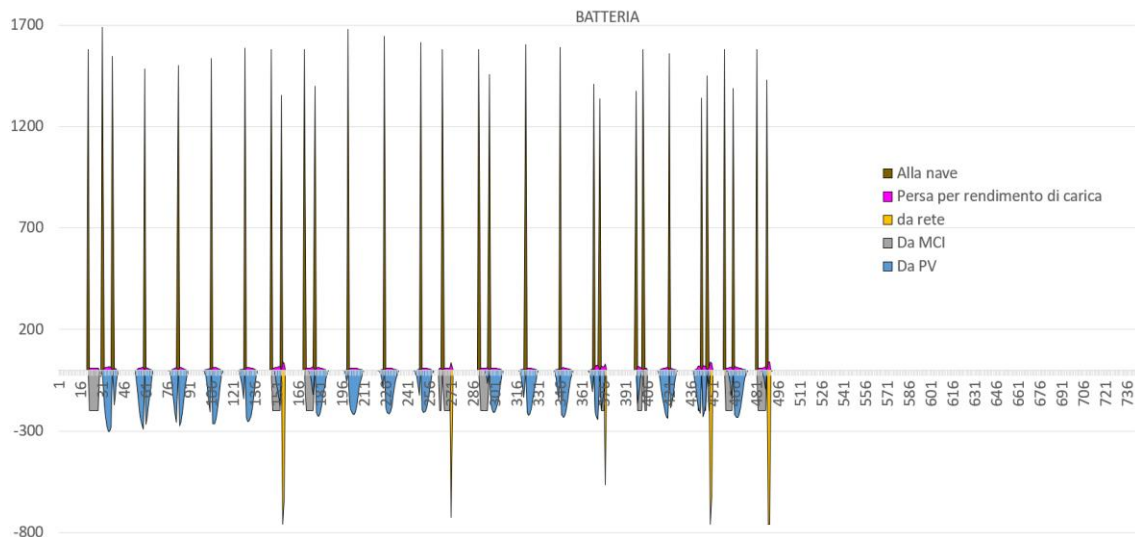


Figura 3.23 Potenza scambiata dalla batteria nel mese di aprile [kW – ore]

L'aumento del numero delle ore in cui riesce essere in funzione è legato al fatto che si riesce a ricaricare più velocemente grazie ad un irraggiamento medio mensile maggiore, in numeri nel mese di aprile si ha un valore medio di $0,234874 \text{ kW/m}^2$ contro i $0,209488 \text{ kW/m}^2$ di gennaio.

3.3.8.4 LUGLIO

Il tragitto della nave nel mese di luglio è da Dalian verso Aden.

Il tragitto è caratterizzato da una variabilità dell'irraggiamento a causa della variazione delle località in cui si trova la nave, in particolare abbiamo che i pannelli solari a Dalian sono soggetti, nell'ora con maggiore intensità, ad un irraggiamento di $0,77 \text{ kW/m}^2$, mentre a Aden di $0,71 \text{ kW/m}^2$.

L'andamento dell'irraggiamento che impatta sui pannelli solari nel mese di luglio è riportato in figura 3.24, dove si può osservare un valore dell'irraggiamento medio mensile di $0,210976 \text{ kW/m}^2$, mostrando un calo rispetto al mese di aprile.

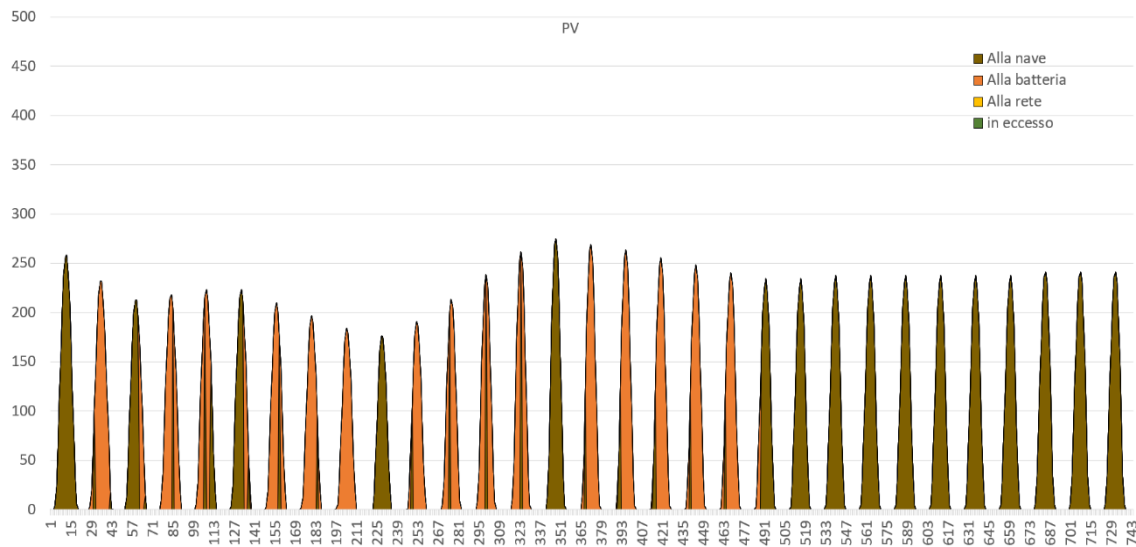


Figura 3.24 Potenza erogata dai pannelli fotovoltaici nel mese di luglio [kW - ore]

L'andamento orario della richiesta di energia e di quella erogata sono riportate rispettivamente nelle figure 3.25 e 3.26. Questi due andamenti combaciano a meno di un errore assoluto orario di $\pm 7,62939E-05$, mentre su tutto il mese si compie un errore assoluto di $\pm 0,00901635$ kW. Invece l'errore relativo che si compie su ogni ora è minore di $1,5258788E-05$ mentre l'errore relativo su tutto il mese è di $1,02737E-06$.

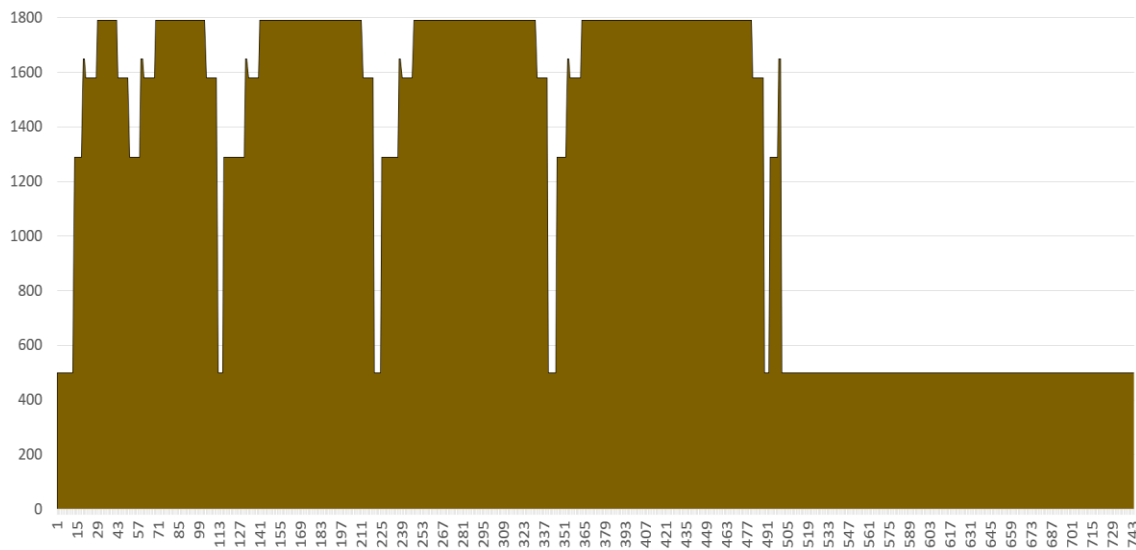


Figura 3.25 Richiesta della nave nel mese di luglio [kW - ore]

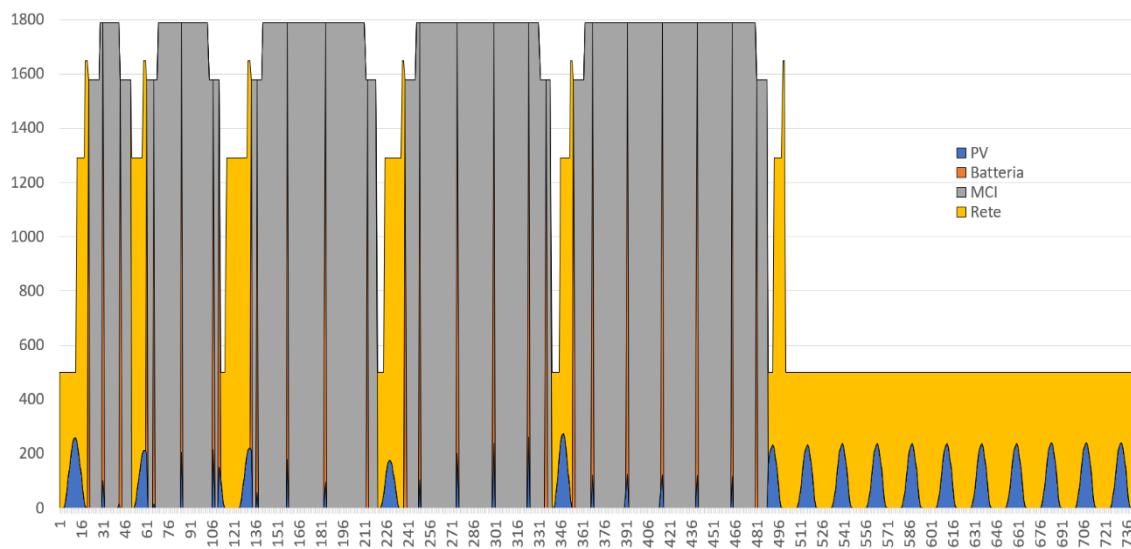


Figura 3.26 Potenza erogata dal motore ibrido e dalla rete nel mese di luglio [kW – ore]

Le considerazioni fatte sui contributi dei singoli sistemi energetici sono ancora valide anche nel mese di luglio ed inoltre è valida pure la limitazione del motore nella fase di ricarica della batteria, come è visibile nella figura 3.27. Nella figura 3.26 si può notare il calo del contributo dei pannelli fotovoltaici, sia per il fatto che le ore in cui la batteria eroga energia alla nave è 26 ore contro le 30 del mese di aprile e sia perché i valori di potenza prodotta dai pannelli è minore, dato riscontrabile confrontando i grafici nelle figure 3.20 e 3.24.

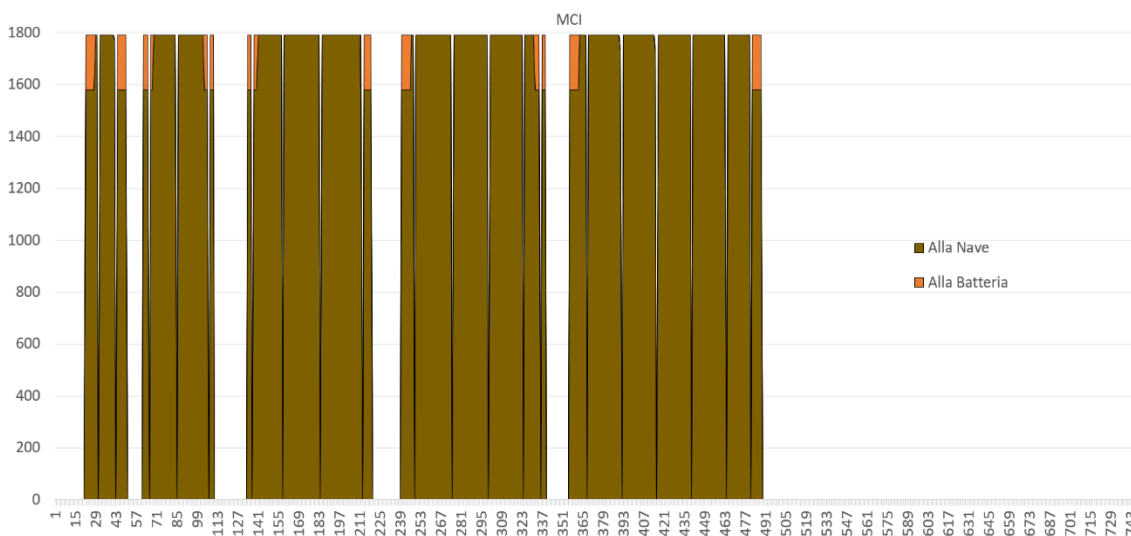


Figura 3.27 Potenza erogata dal motore diesel nel mese di luglio [kW – ore]

3.3.8.5 OTTOBRE

Il tragitto del mese di ottobre ha inizio dal porto di Aden e ha come arrivo il porto di Dalian.

L'irraggiamento medio nel mese di ottobre è il valore più basso fra i mesi analizzati, il suo valore è pari a $0,181368 \text{ kW/m}^2$, implicando che durante il periodo di navigazione, per le ragioni connesse al fatto che la batteria viene ricaricata principalmente dai pannelli fotovoltaici, le ore in cui la batteria soddisfa le richieste della nave sono 27.

Una considerazione da fare è che nonostante un irraggiamento medio minore del mese di gennaio si ottenga un numero di ore maggiore in cui la batteria eroga energia alla nave. Ciò che si potrebbe concludere è che i pannelli nel mese di gennaio, ricevono una minore quantità di irraggiamento durante la navigazione rispetto al mese di ottobre, questo perché ricevono la più parte di essa mentre sono ormeggiate. Infatti, come si può vedere dalla figura 3.29, l'irraggiamento medio mensile durante le ore *offshore* è maggiore nel mese di ottobre rispetto al mese di gennaio.

Si può concludere un importante legame fra le ore in cui la nave è in movimento o è ormeggiata con le ore con cui la batteria eroga energia. Ciò che vorremmo è che la nave stia ormeggiata durante le ore in cui l'irraggiamento è nullo, mentre si vuole che l'irraggiamento medio durante la navigazione sia più alto possibile. Tutto ciò in un'ottica di ridurre le emissioni prodotte, siccome sono maggiori le ore in cui la batteria eroga energia e sono minori le ore in cui il motore diesel è attivo, come si può vedere in figura 3.28.

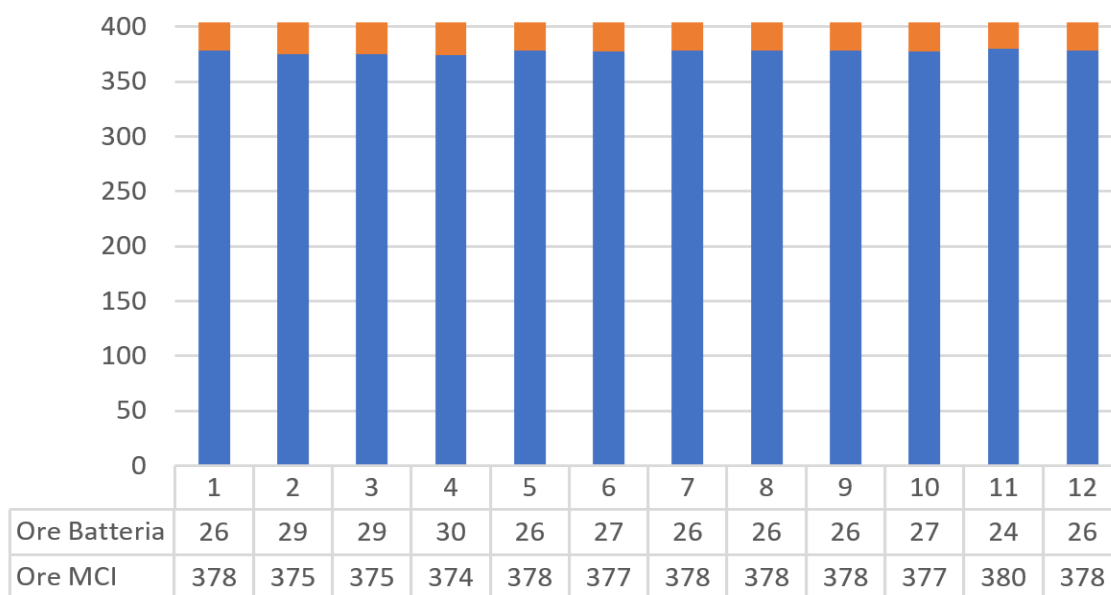


Figura 3.28 Istogramma della suddivisione delle ore di navigazione [ore – mesi]

Confrontando i risultati delle figure 3.28 e 3.29 si può osservare la relazione fra le ore in cui la batteria è accesa con l'irraggiamento medio mensile nelle ore *offshore*, si può notare che nei mesi di febbraio, marzo e aprile si può attribuire un maggior numero di ore di funzionamento, vedi figura 3.28, dato il maggiore irraggiamento, vedi figura 3.29.

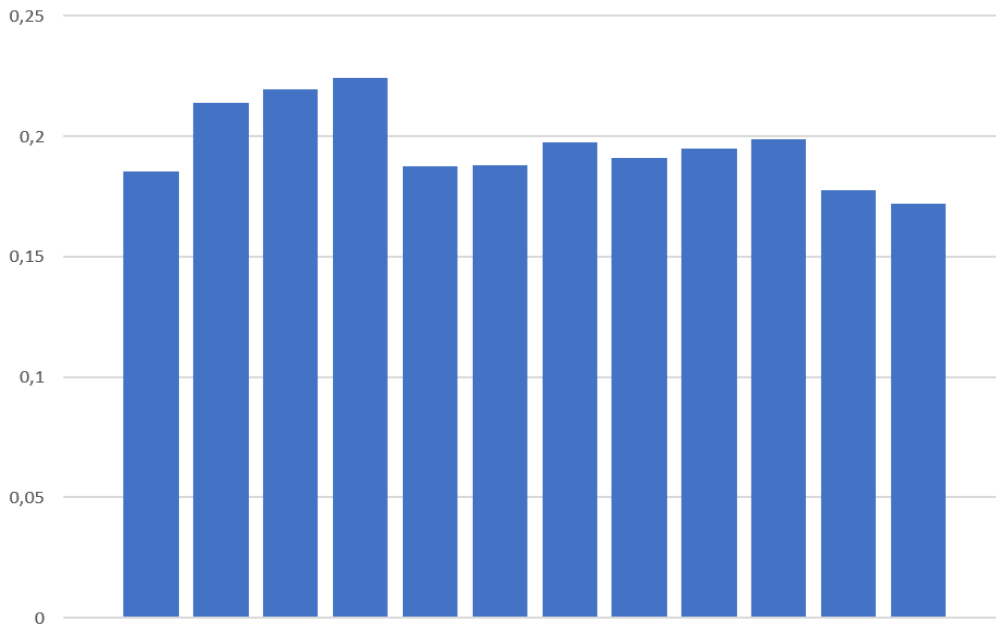


Figura 3.29 Irraggiamento medio mensile nelle ore offshore [Irraggiamento – mesi]

Gli andamenti della richiesta della nave e della potenza erogata dal motore ibrido per soddisfarla sono riportati nelle figure 3.30 e 3.31.

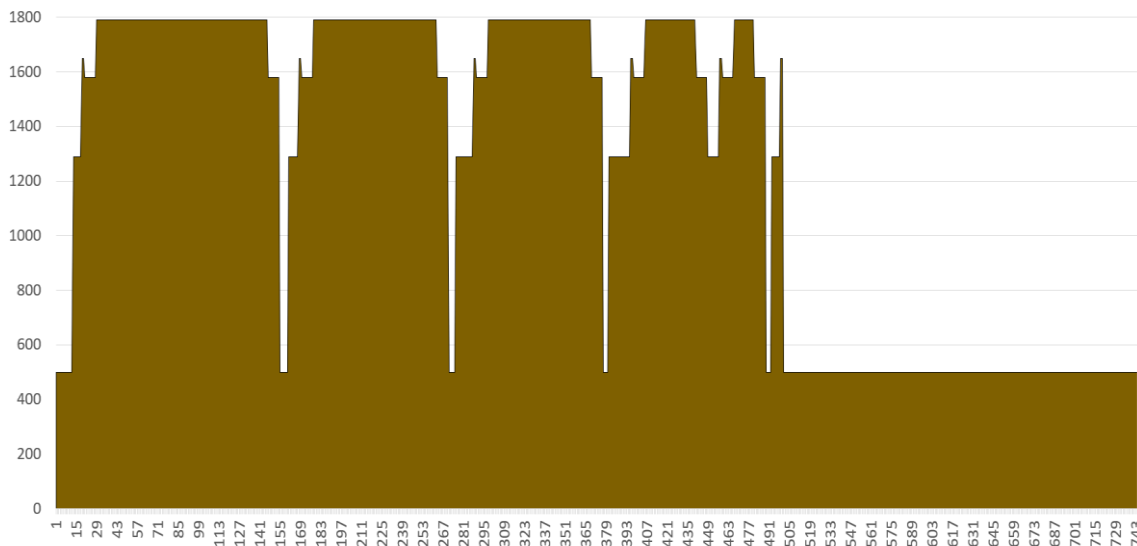


Figura 3.30 Richiesta della nave nel mese di ottobre [kW – ore]

Si noti che la distribuzione delle potenze all'interno del motore viene simulata bene dal codice siccome gli andamenti combaciano a meno di un errore assoluto orario minore di $\pm 0,000178337$ kW. Gli errori relativi che si compiono sono minori del valore di precisione di soglia impostagli e si hanno degli errori relativi orari minori di $1,38426E-05$ e un errore relativo mensile di $9,48645E-07$.

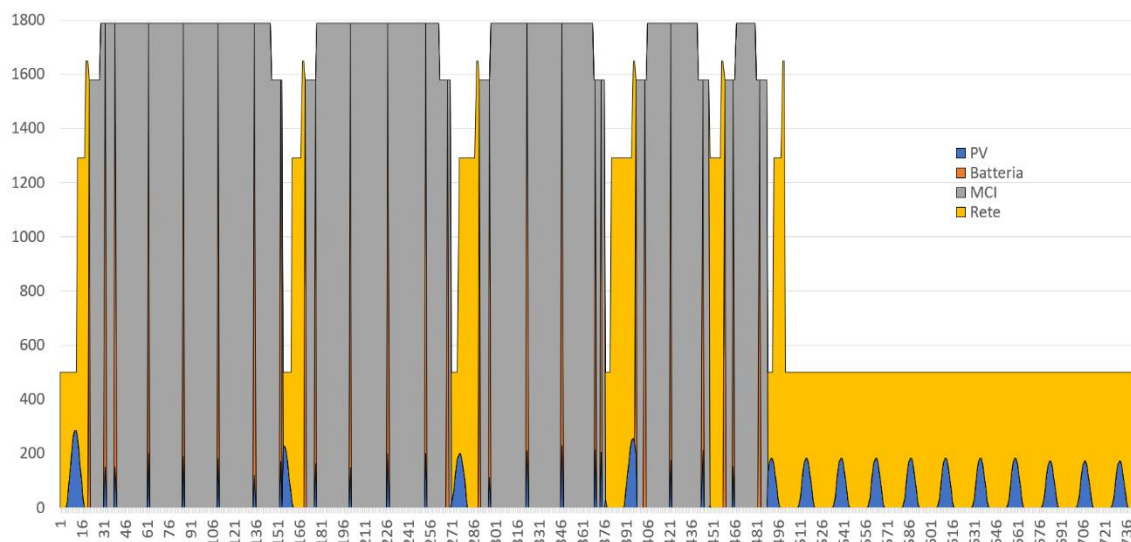


Figura 3.31 Potenza erogata dal motore ibrido e dalla rete nel mese di ottobre [kW – ore]

Fino ad ora sono stati riportati solamente quattro mesi campione visto che negli altri mesi i valori ottenuti sono riconducibili a quelli riportati dei mesi in esame. Un dato rilevante potrebbe essere nel caso in cui il codice nei mesi non presi in analisi ottenga dei risultati che si scostano al di fuori di un certo *range* dal valore desiderato.

Successivamente vengono elencati gli errori massimi ottenuti:

- Errore assoluto orario: 0,000178337 kW (ottobre);
- Errore assoluto giornaliero: 0,000668056 kW (novembre);
- Errore assoluto settimanale: 0,003286444 kW (novembre);
- Errore assoluto mensile: 0,009690423 kW (agosto);
- Errore relativo orario: 1,5831E-05 (agosto);
- Errore relativo giornaliero: 1,88805E-06 (giugno);
- Errore relativo settimanale: 2,9893E-05 (luglio);
- Errore relativo mensile: 1,04462E-06 (novembre).

Tutti i valori, anche se sono i più grandi ottenuti, sono comunque errori ammissibili.

L'obiettivo per ridurre le emissioni è far sì che le ore in cui il motore è acceso diminuiscano o equivalentemente che le ore di funzionamento della batteria aumentino.

Il fine ultimo resta comunque ridurre i litri di combustibile usati e ridurre le emissioni inquinanti.

Per avere un numero di ore maggiore di funzionamento della batteria si può agire su vari parametri che influiscono in maniera più o meno diretta.

Il problema perciò è la possibilità della batteria di erogare energia, attualmente il problema è riassumibile in due punti, il primo è che non è sufficientemente capiente, mentre la seconda è che deve fornire troppa energia causato da un *gap* eccessivo fra la potenza richiesta e la potenza dei pannelli fotovoltaici.

La considerazione più immediata è quella di aumentare la capacità della batteria e/o il numero delle batterie presenti. Come visto la capacità attuale è di 2.600 kWh, facendo riferimento alla Color Hybrid, si è visto che si potrebbe aumentare la capacità fino a 5.000 kWh.

Altri parametri su cui si potrebbe agire facilmente sono la superficie dei pannelli fotovoltaici e il loro rendimento. Come si è visto, la ricarica della batteria è strettamente correlata all'energia prodotta dai pannelli fotovoltaici, perciò agendo su questi si avrebbe una ricarica più rapida. Ricaricandosi più velocemente si ha che alla fine di un tragitto le ore in cui la batteria sarà accesa dovrebbero essere maggiori e perciò le ore di funzionamento del motore ridotte.

Come appena detto, in questo caso, la maggior parte della ricarica della batteria arriva dai pannelli; questo siccome si è fissato come potenza massima del motore la massima potenza che la nave può richiedere, non avendo perciò mai a disposizione un margine sul motore per poter ricaricare la batteria. Quindi si potrebbe agire sulla potenza massima erogabile dal motore.

Un'altra simulazione che è possibile fare connessa al motore è quella di stimare il calore prodotto durante le sue ore di funzionamento, il quale si potrà sfruttare attraverso una pompa di calore ad assorbimento o attraverso un gruppo frigorifero ad assorbimento. Questo recupero energetico permette al motore di diminuire la potenza da erogare alla nave così da poterla indirizzare verso la batteria per una più rapida ricarica.

Un'ultima simulazione potrebbe essere quella di far cadere una o più assunzioni fatte per la definizione del modello. Si potrebbero modificare gli intervalli di tempo delle tratte che compie la nave. Come introdotto nel paragrafo "descrizione del caso preso in analisi" si sono fissate le ore di ogni tratta assumendo una velocità costante su tutto il tragitto mensile, assunzione non vera siccome in seguito sono state fissate le ore di tipologia di navigazione. Le tipologie di navigazione sono due e per far sì che la velocità sia costante il loro rapporto deve essere uguale per ogni tratta, se il rapporto fra le ore di navigazione non è uguale allora neanche la velocità media lo sarà. L'obiettivo di modificare le velocità della nave nelle singole tratte ha lo scopo di aumentare l'irraggiamento medio mensile nelle ore *offshore*. Il caso ideale è quello in cui la navigazione avvenga durante le ore diurne mentre l'ormeggio nei porti sia il più possibile nelle ore notturne, così da avere un irraggiamento medio mensile nelle ore *onshore* più basso possibile.

3.3.8.6 CONCLUSIONI DEL CASO STANDARD

Nel caso standard non è possibile trarre delle conclusioni siccome ci si è limitati a descrivere ciò che avviene nel sistema motore ibrido-rete elettrica, anche se come detto in questa analisi al caso reale è stato già integrato il cold ironing.

Nella tabella 3.3 oltre i valori ottenuti per ogni mese di rendimento medio del motore a combustione interna, i suoi consumi specifici medi mensili e il combustibile consumato in tutto il mese, si è aggiunta una quarta colonna nella quale si sono riportati i litri di combustibile che il motore consumerebbe se non fosse presente il cold ironing, ovvero se nelle ore di *Port-Stay* la richiesta energetica della nave venisse erogata non più dalla rete elettrica, ma dal motore.

Confrontando le ultime due colonne della tabella 3.3 si ottiene che per ogni mese il cold ironing riesce ad evitare che 50.000 litri vengano consumati in prossimità di centri abitati, così da migliorare la qualità dell'area del centro abitato.

Mesi	Rendimento MCI [%]	Consumi specifici [g/kWh]	Combustibile [litri]	Combustibile senza cold ironing [litri]
Gennaio	42,7537	197,19693	149.926	199.525
Febbraio	42,7539	197,19603	148.850	192.180
Marzo	42,7539	197,19603	148.659	196.966
Aprile	42,7539	197,19603	148.539	195.669
Maggio	42,7539	197,19601	149.877	199.593
Giugno	42,7539	197,19604	149.662	196.595
Luglio	42,7538	197,19662	149.926	199.495
Agosto	42,7539	197,19601	150.020	199.828
Settembre	42,7539	197,19601	149.925	196.663
Ottobre	42,7539	197,19601	149.614	201.271
Novembre	42,7539	197,19624	150.738	197.270
Dicembre	42,7538	197,19641	150.068	203.394

Tabella 3.3 Valori medi mensili di rendimento e consumo specifico del motore diesel e valori totali di combustibile consumato nell'intero mese

3.3.9 SIMULAZIONI

Per integrare al caso standard le simulazioni lo *UseForm* è stato modificato per poter agire sui parametri di rendimento dei pannelli fotovoltaici, le loro superfici, la capacità della batteria e la potenza massima del motore diesel.

L'interfaccia grafica dello *UseForm* non è cambiata, ma sono state aggiunte delle *ListBox* per ciascuno dei parametri.

Le simulazioni consistono nell'analizzare lo stesso percorso con la nave soggetta allo stesso irraggiamento e le stesse richieste di potenze. L'obiettivo delle simulazioni è quello di andare a confrontare i risultati di ciascuna simulazione per ridurre i litri di combustibile usati e per minimizzare di conseguenza le emissioni. Per confrontare i risultati bisogna andare alla pagina "ConsumiMCI", nella quale sono stati riportati i rendimenti del motore η . Da questo valore, se diverso da zero, si calcola il consumo specifico c_s [g/kWh] e la portata media di combustibile in una determinata ora \dot{m}_{fuel} [kg/s] per ogni ora. In fondo alla tabella del foglio "ConsumiMCI" sono riportati i valori medi nella riga 747 sotto ogni colonna ed inoltre nella riga 748 sotto la colonna \dot{m}_{fuel} vengono riportati i litri di combustibile usati in quel mese per ogni simulazione.

3.3.9.1 SIMULAZIONE 1

La simulazione 1 consiste nel sostituire il motore standard con il solo motore diesel tal quale del motore diesel presente nel motore ibrido del caso standard. In questa simulazione il motore diesel è l'unica fonte di energia della nave e perciò dovrà rimanere acceso sia durante la navigazione che durante il periodo di fermo nei porti.

Essendo l'unica fonte energetica nella nave, a seconda della richiesta della nave cambierà il suo carico senza nessuna possibilità di aumentare la potenza erogata ricaricando la batteria siccome assente. Questa poca libertà comporta un consumo specifico maggiore siccome si avranno dei rendimenti minori a causa di carichi anch'essi minori. Inoltre a causa dei rendimenti minori si avrà anche un aumento della \dot{m}_{fuel} a parità di richiesta della nave.

I risultati della simulazione 1 vengono riportati nel foglio di calcolo "Simulazione1". In tale foglio sono presenti le colonne relative alla richiesta della nave e quelle relative al motore, perciò la colonna "Potenza Richiesta", "Potenza MCI", "Carico" e "Rendimento".

I grafici tracciabili sono solo i grafici delle potenze richieste e di quelle erogate. C'è da notare che il grafico delle potenze erogate e quello delle potenze erogate dal motore diesel sono le stesse.

In questa simulazione non ci sono errori, siccome non ci sono approssimazioni di calcolo visto che non c'è la batteria.

3.3.9.1.1 GENNAIO

Il mese di gennaio ha un tragitto che va da Dalian a Aden.

Come anticipato nella introduzione i due grafici coincidono con l'assenza di errori e tutta l'energia viene erogata dal motore diesel.

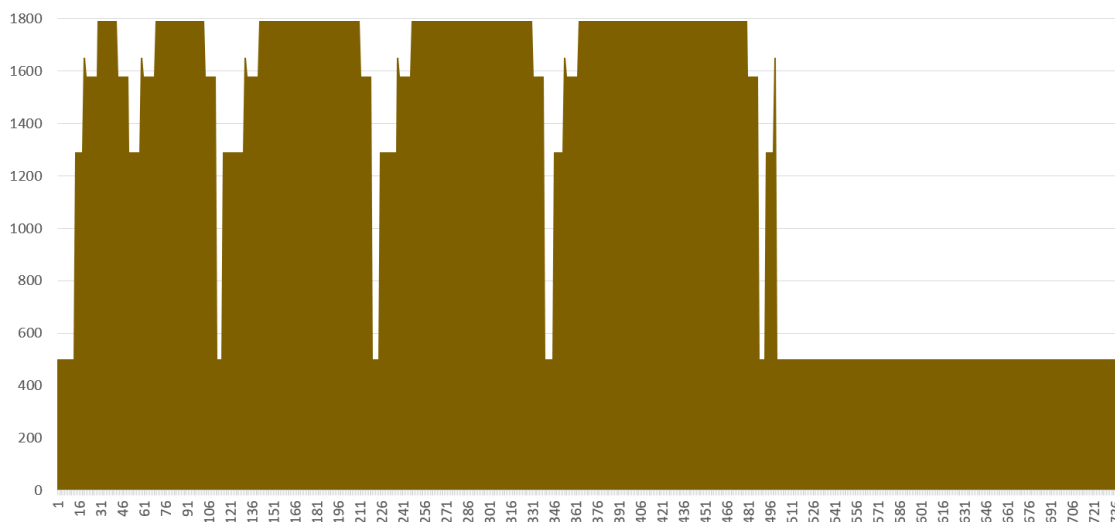


Figura 3.32 Richiesta della nave nel mese di gennaio [kW - ore]

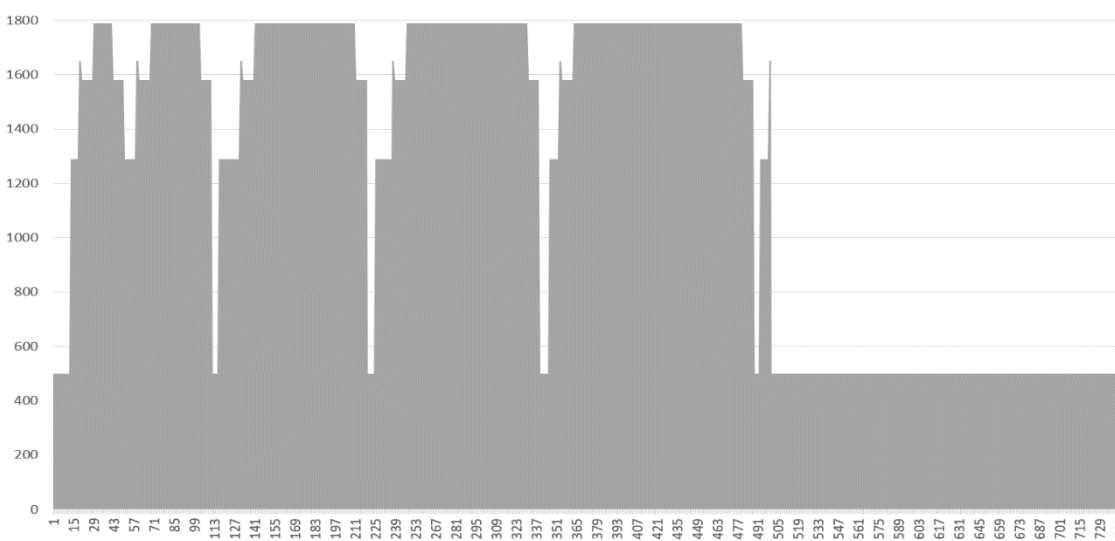


Figura 3.33 Potenza erogata dal motore diesel nel mese di gennaio [kW - ore]

Una considerazione la si può fare analizzando la figura 3.33. Il motore eroga dell'energia in funzione unicamente della richiesta della nave, perciò dovrà seguire la sua richiesta discostandosi dal rendimento di design andando a lavorare anche con dei carichi molto bassi, per esempio quando la nave è ormeggiata in porto nella fase di "Ancoraggio" il motore lavora con un carico di 0,2793 che comporta un rendimento di 38,6930 % contro il 42,7538 % di rendimento massimo.

Se confrontiamo i valori medi di carico e di rendimento del caso standard con quello della simulazione 1 otteniamo rispettivamente dei valori di carico medio di 0,9996 e di 0,6995 e di rendimento medio di 42,7537 % e di 41,1920 %.

Il motore nella simulazione 1, oltre ad essere sempre in funzione, ha dei rendimenti più bassi, che perciò comportano dei consumi specifici maggiori. In particolare abbiamo che il valore di consumo specifico oscilla in un *range* compreso fra 197,1966 g/kWh e 217,8946 g/kWh con un valore medio mensile di 205,1316 g/kWh. Il caso standard è caratterizzato da un consumo specifico di 197,1969 g/kWh.

Confrontando infine i litri usati nel caso standard si ha un consumo di 149.925 litri contro i 214.970 litri e che rappresenta un aumento dei consumi del 43,38% rispetto al caso studio.

3.3.9.1.2 APRILE

Il tragitto di aprile va da Aden a Dalian.

Gli andamenti delle figure 3.34 e 3.35 sono uguali senza alcun errore.

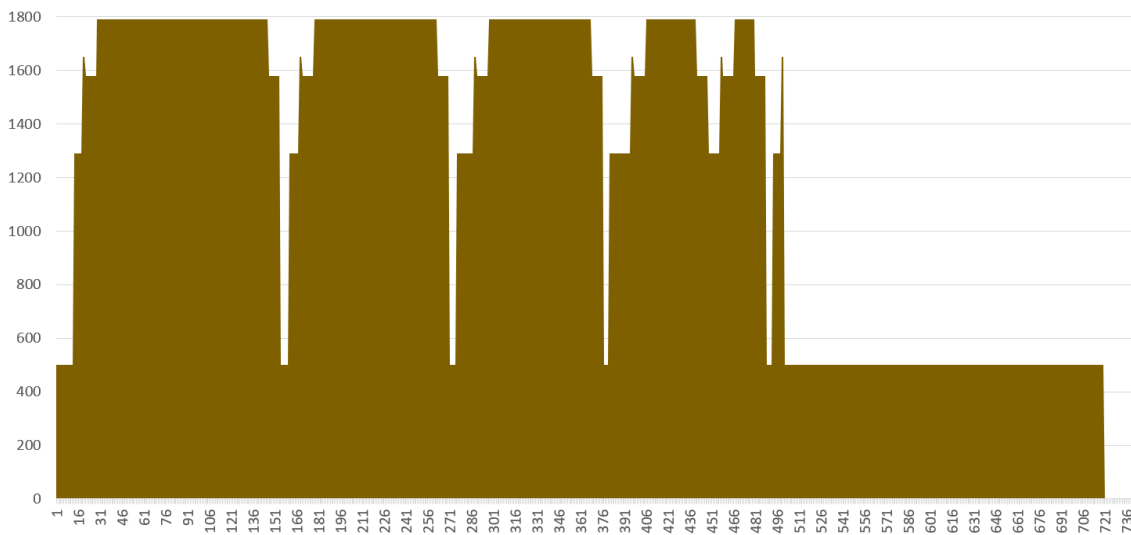


Figura 3.34 Richiesta della nave nel mese di aprile [kW – ore]

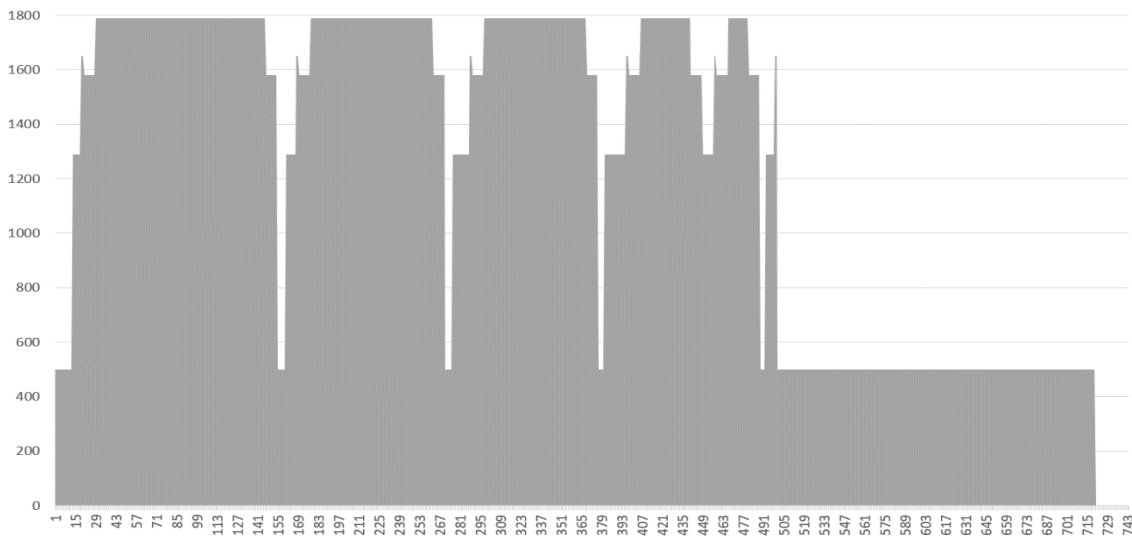


Figura 3.35 Potenza erogata dal motore diesel nel mese di aprile [kW - ore]

Le considerazioni fatte per il mese di gennaio sono ancora valide, ovvero che la simulazione 1 non essendo flessibile ha un'efficienza peggiore rispetto al caso di motore ibrido, in particolare la flessibilità del caso standard è data dalla batteria.

La simulazione 1 è caratterizzata da un carico medio minore, in particolare si ha un valore di 0,7135 rispetto il valore di 1 del caso standard. Ciò comporta delle conseguenze sui rendimenti, difatti il rendimento medio del motore diesel nel caso standard è di 42,7538 %, mentre nella simulazione 1 è di 41,2753 %.

I consumi specifici dei due motori invece sono, per il caso standard, pari a 197,196 g/kWh, mentre per la simulazione 1 si ha un valore medio di consumo specifico di 204,7063 g/kWh.

La simulazione 1 è caratterizzata da un consumo del combustibile di 211.962 litri contro i 148.539 litri del caso standard. La differenza fra i due casi è un aumento dei consumi di combustibile del 42,70%.

3.3.9.1.3 LUGLIO

Il tragitto del mese di luglio ha come partenza Dalian e come destinazione Aden.

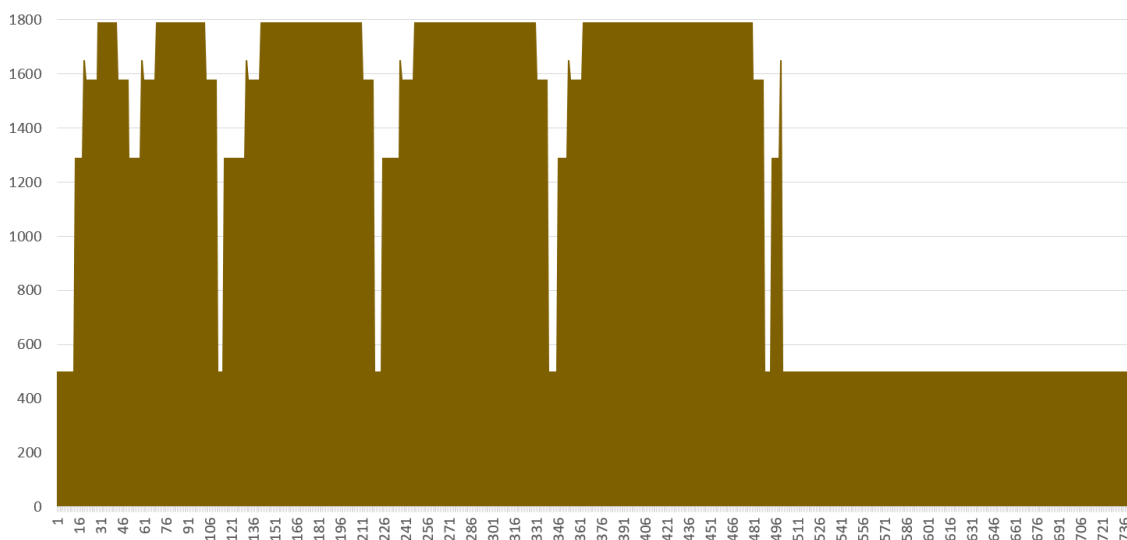


Figura 3.36 Richiesta della nave nel mese di luglio [kW - ore]

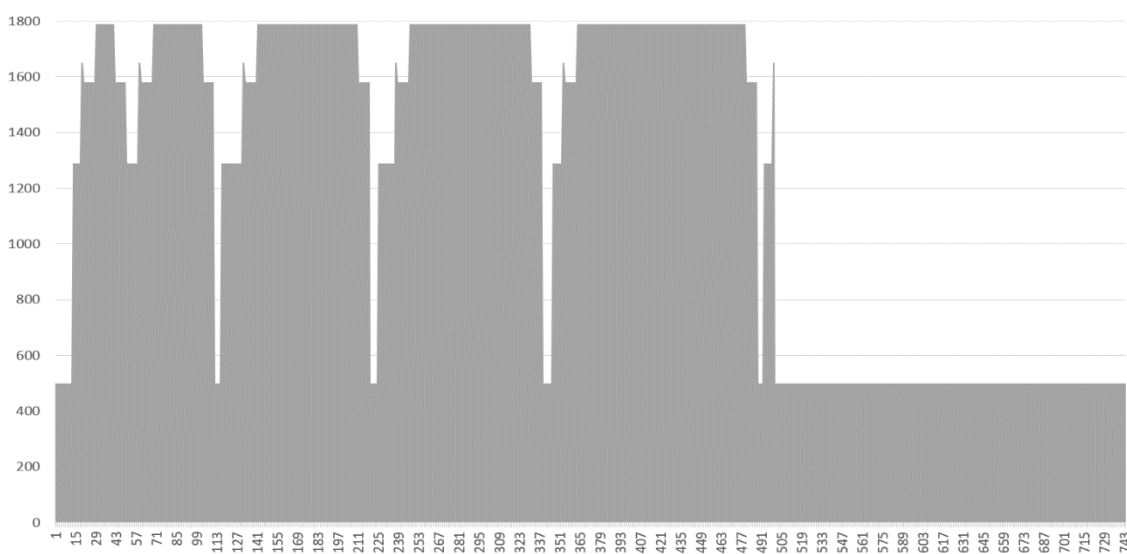


Figura 3.37 Potenza erogata dal motore diesel nel mese di luglio [kW - ore]

Il carico del motore diesel nel mese di luglio assume dei valori diversi nelle due simulazioni, nel caso standard ha un valore medio di 0,9891, mentre nella simulazione 1, a causa delle ragioni precedentemente elencate, si ha un valore medio di 0,7135. Valori differenti del carico, a causa dell'andamento del rendimento del carico stesso, comportano dei valori diversi del rendimento medio, in particolare nel mese analizzato si ha un rendimento medio per il caso standard di 42,7538 %, mentre nel caso in cui abbiamo solamente il motore diesel si ha un rendimento medio di 41,1920 %.

A causa di rendimenti più bassi si hanno dei consumi specifici più alti nel caso della simulazione 1, il suo valore medio mensile è di 205,1316 g/kWh, mentre per il caso standard si ha il valore medio mensile del consumo specifico di 197,1966 g/kWh.

Confrontando i litri consumati nel mese di luglio nella simulazione 1 si ha un maggiore consumo del combustibile pari del 43,38%. In particolare nel caso standard si consumano 149.925 litri e nella simulazione 1 si usano 214.970 litri.

3.3.9.1.4 OTTOBRE

Il mese di ottobre si ha che la petroliera parte dal porto di Aden dirigendosi verso il porto di Dalian.

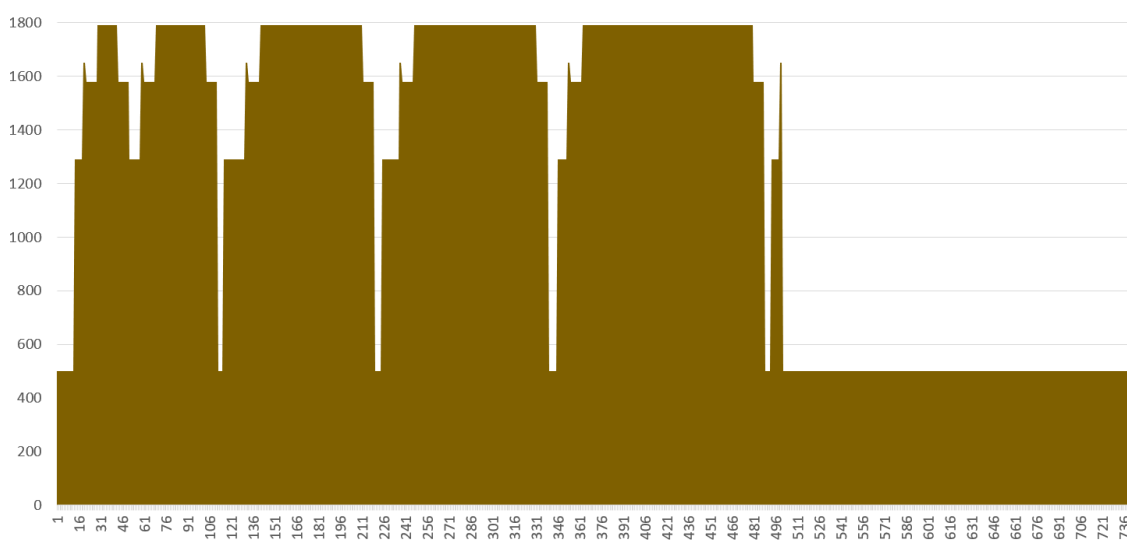


Figura 3.38 Richiesta della nave nel mese di ottobre [kW - ore]

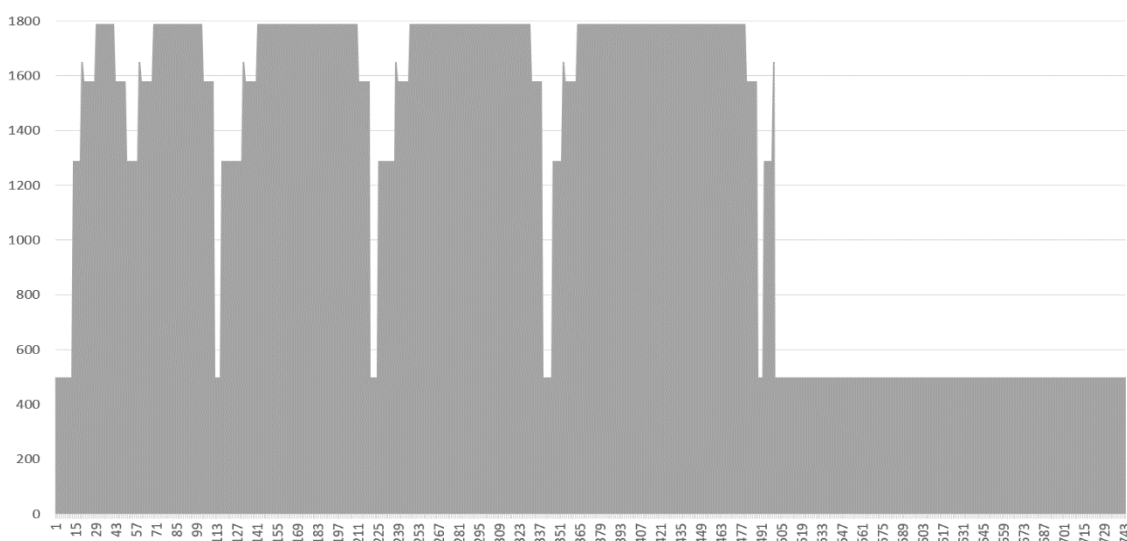


Figura 3.39 Potenza erogata dal motore diesel nel mese di ottobre [kW - ore]

Il caso standard è caratterizzato da valori massimi ottenibili con il motore preso in analisi, ovvero ha carico unitario e perciò un rendimento medio mensile di 42,7539 %. La simulazione 1, come avvenuto negli altri 3 mesi presi in analisi, ha entrambi i valori minori, ovvero ha un carico pari a 0,7135 che corrisponde a un rendimento medio mensile di 41,1920 %.

I consumi specifici, che vengono calcolati per ogni ora, sono strettamente legati al rendimento del motore. Le due grandezze sono inversamente proporzionali perciò, a valori minori di rendimento, si avranno valori maggiori di consumi specifici. La simulazione 1 ha nel mese di ottobre un valore medio mensile del consumo specifico di 205,1316 g/kWh, valore maggiore del caso standard che è di 197,1960 g/kWh.

Il caso standard nel mese di ottobre ha un consumo di combustibile di 149.614 litri contro i 214.970 litri della simulazione 1, che perciò corrisponde ad un aumento del 43,68%.

3.3.9.1.5 CONCLUSIONI DELLA SIMULAZIONE 1

Per riassumere le considerazioni fatte fra il caso standard e la simulazione di puro motore diesel si ha che risulta più conveniente il caso standard. Il vantaggio del caso standard è di avere un numero di ore minore di funzionamento del motore ed anche che durante le sue ore di operatività ha rendimenti maggiori, in particolare in quasi tutti i mesi analizzati ha valori prossimi al rendimento massimo ottenibile dal motore diesel preso in analisi.

Il rendimento essendo minore ed essendo inversamente proporzionale al consumo specifico, fa sì che quest'ultimo assuma dei valori maggiori, che significa un consumo maggiore del combustibile a parità di energia erogata.

Analizzando infine i litri usati si ha che la simulazione 1 è soggetta ad un consumo del combustibile sempre maggiore del 40% rispetto al caso standard.

Il caso di puro motore diesel è soggetto a rendimenti più bassi soprattutto al fatto di dover soddisfare le richieste della nave nel periodo di ormeggio nei porti, ore nelle quali la nave è soggetta a dei carichi più bassi e forzando il motore a lavorare molto lontano dal punto di design.

3.3.9.2 SIMULAZIONE 2

La simulazione 2 è il caso di puro cold ironing, ovvero si è migliorata la simulazione 1 cambiando la sua logica durante le ore di ormeggio. In questa simulazione si avrà che nelle ore in cui la nave sta navigando il carico della nave è fornito dal motore diesel, mentre nelle ore in cui sta in porto sarà la rete elettrica terrestre a soddisfare il carico della nave.

Dalle considerazioni fatte a seguito della simulazione 1 si dovrebbe avere una notevole riduzione dei litri di combustibile usati, a seguito di un minor numero di ore di operatività del motore minore, ma anche per il fatto che il motore opererà con rendimenti maggiori. Quest'ultima considerazione è dovuta al fatto che la simulazione 1 era caratterizzata da rendimenti bassi soprattutto per le ore di fermo in porto.

I risultati della simulazione 2 sono riportati in una tabella nel foglio di calcolo “Simulazione2”, nella quale ci sono le stesse colonne presenti nella “Simulazione1” ma con in aggiunta solamente la colonna della rete elettrica.

Tutti i risultati della simulazione 2 non sono soggetti a errori siccome per la suddivisione dei carichi si eseguono solamente addizioni e sottrazioni, perciò non si hanno errori causati da dalle approssimazioni.

3.3.9.2.1 GENNAIO

Il mese di gennaio ha un percorso con partenza dal porto di Dalian e con destinazione quello di Aden.

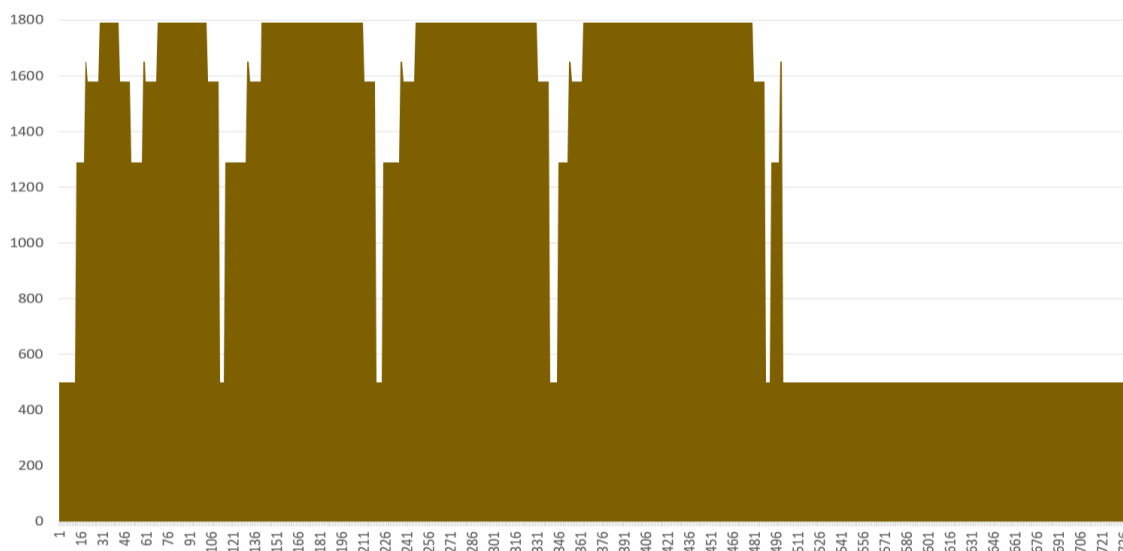


Figura 3.40 Richiesta della nave nel mese di gennaio [kW – ore]

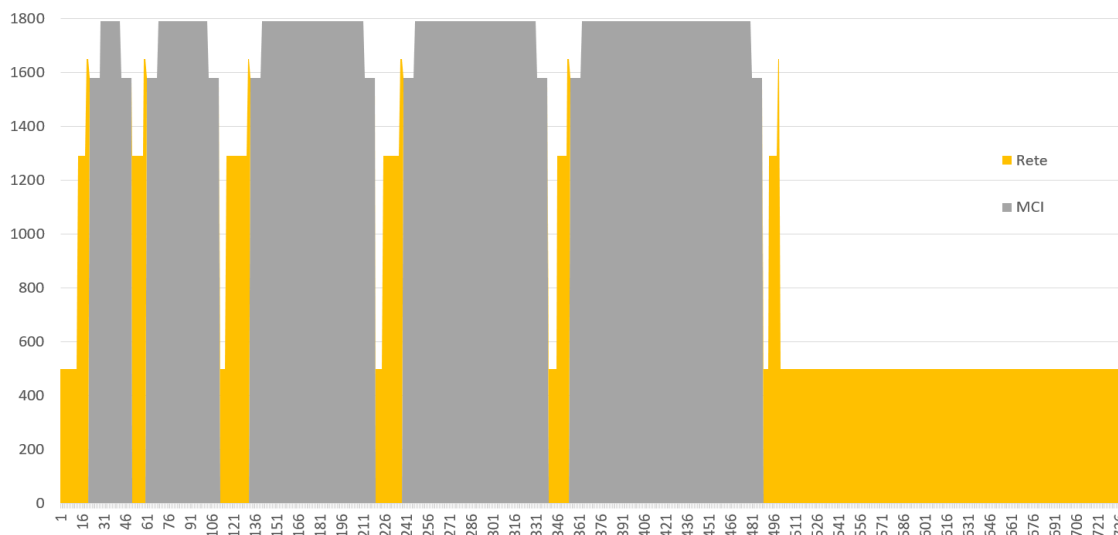


Figura 3.41 Potenza erogata alla nave nel mese di gennaio [kW - ore]

Dal grafico nella pagina 3.41 si vede che la richiesta della nave viene soddisfatta dal motore diesel quando è in mare aperto, mentre nei periodi temporali portuali si ha l'erogazione dell'energia dalla rete elettrica.

Il rendimento medio mensile del motore diesel nella simulazione 2 ha un valore di 42,623 %, confrontando questo valore con quello del caso standard, che è di 42,7537%, si vede che è minore ma non di così tanto come nel caso della simulazione 1 che era 41,192%. Il rendimento ha un 'aumento dell'1,431 % dovuto al non dover erogare energia a carichi bassi a causa del periodo di ancoraggio, nel quale si ha una domanda di 500 kW.

I valori della portata media mensile di combustibile passa da un valore della simulazione 1 di 0,06975 kg/s ad uno di 0,09582 kg/s, valore nettamente più prossimo al valore del caso standard. Un valore medio maggiore ha come significato che, nelle ore in cui è in funzione il motore diesel, lavora con carichi maggiori. Questo con una curva rendimento-carico come quella del nostro caso è altamente desiderato implicando dei rendimenti maggiori e perciò un consumo specifico minore.

Il consumo specifico della simulazione 2 nel mese di gennaio ha un valore medio mensile di 197,3123 g/kWh, valore poco superiore del caso standard che è di 197,1969 g/kWh.

I litri consumati in questo mese sono per il caso standard 149.925 litri e per la simulazione 2 159.951 litri, valore nettamente migliore della simulazione 1.

3.3.9.2.2 APRILE

Nel mese di aprile la petroliera compie il tragitto partendo da Aden.

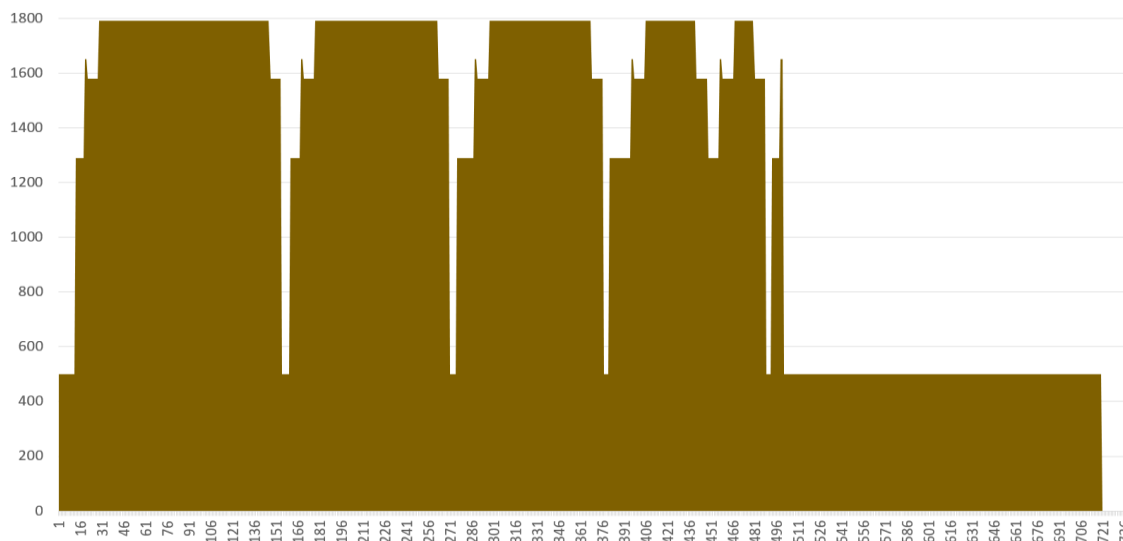


Figura 3.42 Richiesta della nave nel mese di aprile [kW - ore]

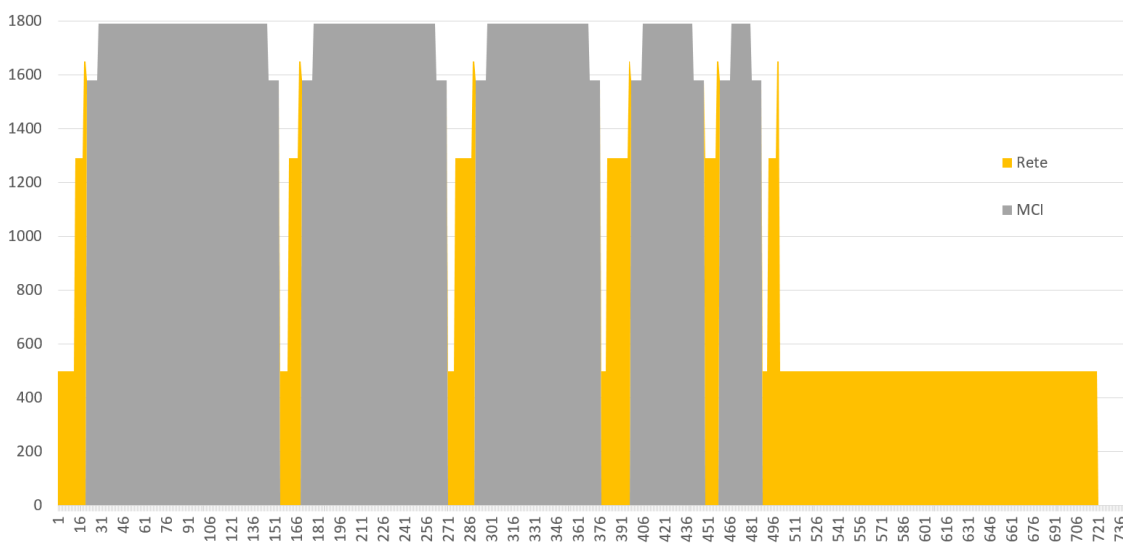


Figura 3.43 Potenza erogata alla nave nel mese di aprile [kW - ore]

Confrontando la figura 3.43 e la 3.42 si vede che la potenza fornita alla nave è la stessa di quella richiesta.

Durante il mese di aprile il motore diesel nel caso di cold ironing opera con un valore medio di 42,623%, che differisce dal valore del caso standard di poco più di un decimo. A un valore di rendimento medio minore, anche se di poco, corrisponderanno dei valori di consumo specifico e litri consumati maggiori. In particolare si ha un consumo specifico di 197,3122 g/kWh, invece nel caso standard e nella simulazione 1 si hanno rispettivamente 197,1960 g/kWh e 204,7063 g/kWh.

I valori medi di portata di combustibile sono un po' maggiori rispetto il caso standard, però si hanno dei valori decisamente inferiori della simulazione 1. I valori medi sono rispettivamente 159.950 litri, 148.538 litri e 211.961 litri.

3.3.9.2.3 LUGLIO

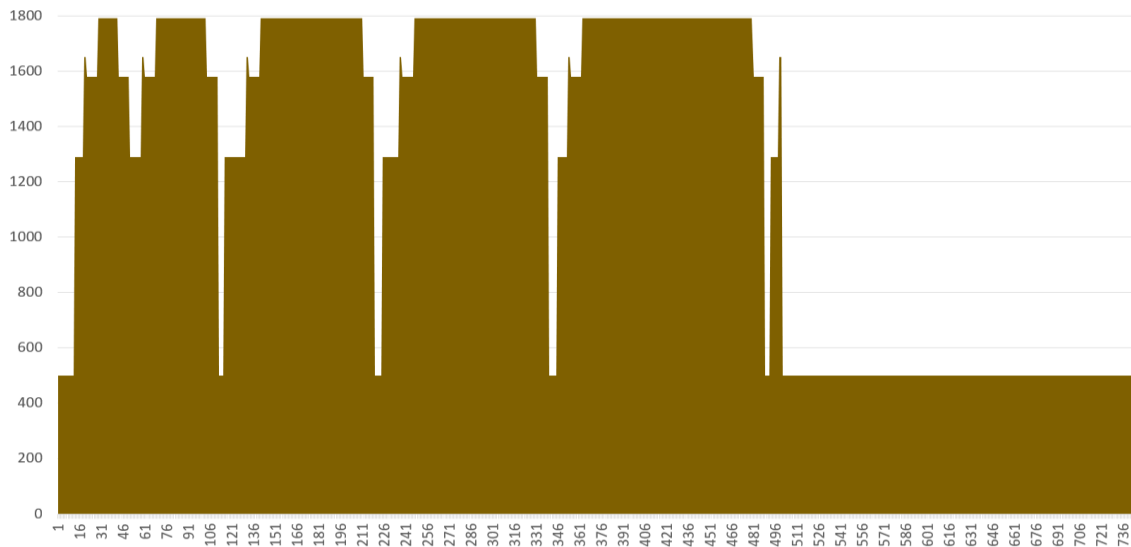


Figura 3.44 Richiesta della nave nel mese di luglio [kW - ore]

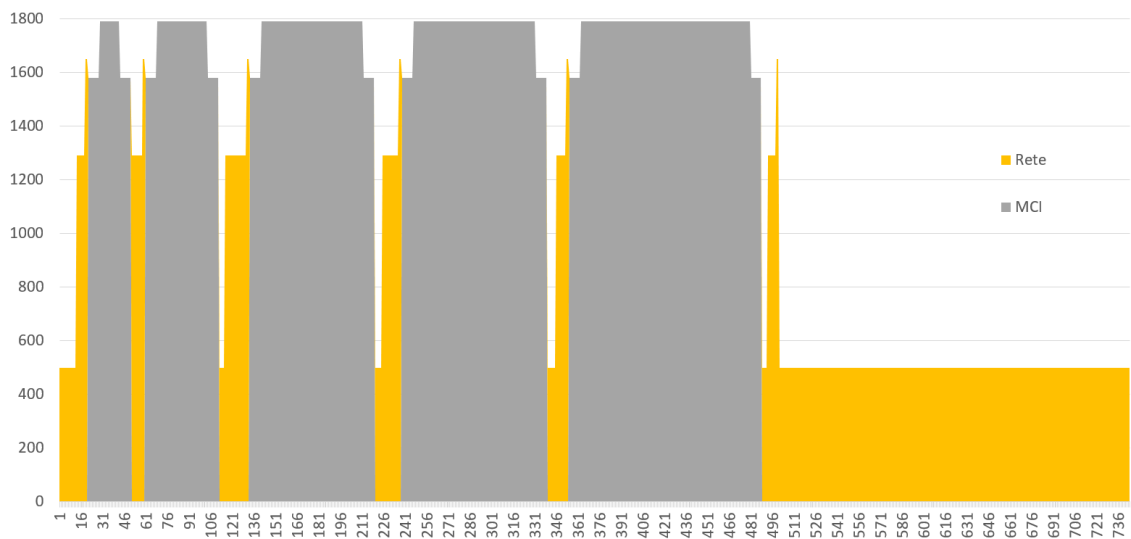


Figura 3.45 Potenza erogata alla nave nel mese di luglio [kW - ore]

Si può notare che i grafici del mese di luglio coincidono con quelli riportati nel mese di gennaio, questo succede siccome nel mese di luglio la petroliera percorre lo stesso tragitto e perciò a causa della indipendenza dalle condizioni di irraggiamento la distribuzione dei carichi fra il motore e la rete sono le stesse. Inoltre coincidono pure i valori di rendimento medio mensile, consumo specifico medio mensile e combustibile consumato che sono rispettivamente 42,623 %, 197,3123 g/kWh e 159.951 litri.

3.3.9.2.4 OTTOBRE

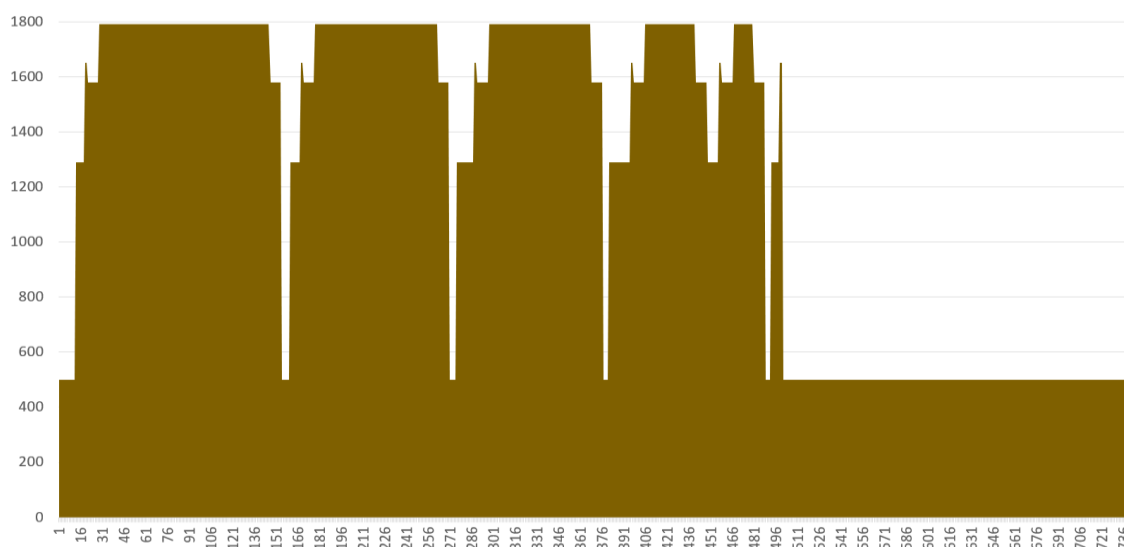


Figura 3.46 Richiesta della nave nel mese di ottobre [kW - ore]

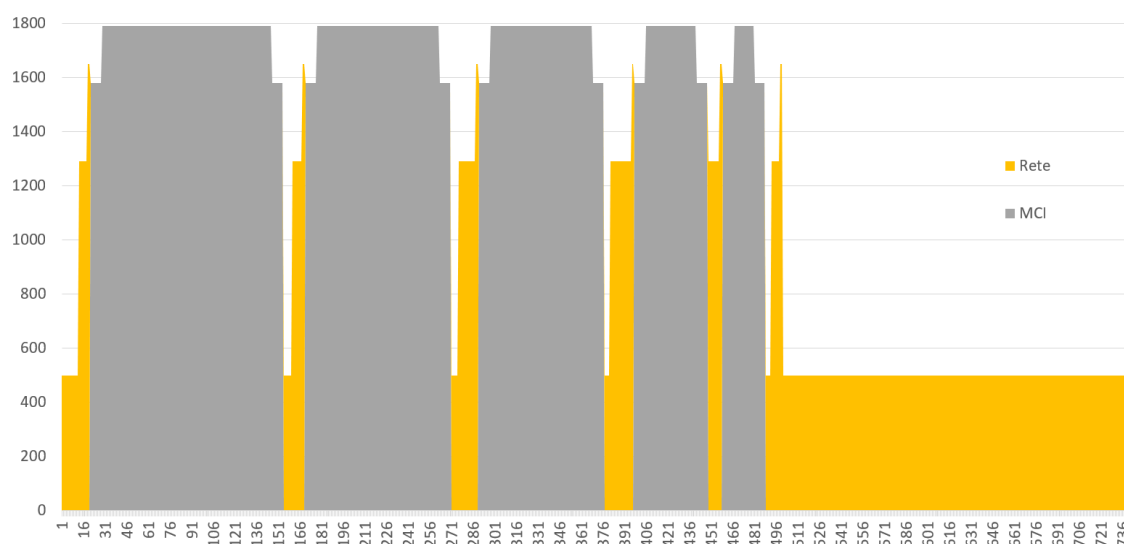


Figura 3.47 Potenza erogata alla nave nel mese di ottobre [kW - ore]

Anche nel mese di ottobre si avrà, per le stesse ragioni del mese di luglio, la coincidenza della distribuzione dei carichi fra motore e rete, però in questo caso coinciderà con il mese di aprile.

I valori, anch'essi uguali a quelli del mese di aprile, sono 42,623% come rendimento medio mensile, 197,3122 g/kWh come consumo specifico medio mensile e infine come combustibile consumato dalla nave, considerando solamente il motore diesel, si hanno 159.950 litri.

3.3.9.2.5 CONCLUSIONI DELLA SIMULAZIONE 2

Per riassumere i risultati ottenuti nella seconda simulazione, che è consistita nel simulare la distribuzione delle potenze nel caso di cold ironing si sono ottenuti dei risultati che si discostano dal caso standard di poco, questa affermazione è sostenuta confrontando i consumi specifici ottenuti per ogni ora in cui il motore diesel è in funzione, infatti si ottengono dei consumi specifici che stanno in un range fra 197,1966 g/kWh e 197,7824 g/kWh corrispondenti alla navigazione durante la navigazione a massima velocità e quella regolare.

I valori di consumi specifici medi nei mesi presi in analisi hanno valori un po' maggiori rispetto al caso standard siccome i risultati ottenuti in quest'ultima simulazione hanno un numero minore di ore in cui il motore è in funzione quando la petroliera naviga con una navigazione regolare. In aggiunta anche quando naviga con una potenza inferiore a quella massima si ha che il motore aumenta il suo carico andando a ricaricare con l'energia *surplus* la batteria. Questo è dovuto alla presenza della batteria nel caso standard che però per il limite di scarica imposto di 1.700 kW. Per erogare dell'energia durante i periodi di navigazione a massima velocità bisogna avere una potenza fornita dai pannelli fotovoltaici almeno di 90 kW, così da poter rientrare nel limite di scarica.

I litri consumati dalla simulazione 2 sono maggiore del caso standard a causa della assenza dell'accumulatore e, soprattutto, della assenza dei pannelli fotovoltaici. La presenza di questi due componenti nel caso standard permette, come visto mentre è stato descritto il caso standard, di poter spegnere il motore per circa 30 ore che rappresenta circa il 7,43% e perciò è scontato che ci saranno dei litri consumati in più per compensare queste ore in cui il motore è spento.

Una piccola digressione confrontando il caso che si incontra maggiormente, ovvero il caso in cui ci sia solamente il motore, e il caso di cold ironing è d'obbligo per comprendere il contributo dato da questa metodologia.

Come introdotto nel capitolo 1 il cold ironing serve per andare a ridurre le emissioni della nave durante il periodo di fermo in porto, che però va in contrasto con un'ottica economica siccome comprare energia elettrica viene a costare di più di quella prodotta all'interno dalla nave.

Nel caso di cold ironing si ottengono dei risparmi di combustibile di 55.019 litri per il mese di gennaio, 52.011 litri per il mese di aprile, 55.019 litri nel mese di luglio e 55.020 litri nel mese di ottobre. A questo risparmio di combustibile sono associati una riduzione delle emissioni inquinanti nelle aree limitrofe alle zone di ormeggio.

3.3.9.3 SIMULAZIONE 3

La simulazione 3 si basa sul modificare il caso standard agendo sui parametri dei pannelli fotovoltaici e lasciando inalterati tutti gli altri parametri. I parametri su cui si agisce sono il rendimento dei pannelli e la loro superficie. I due parametri dei pannelli possono essere modificati contemporaneamente o singolarmente. Nel caso in cui si decida di modificarne uno solo, quello non modificato rimarrà lo stesso del caso standard.

Per modificare i parametri sono state aggiunte allo *UseForm* “PotenzePerOgniOraMese” due *ListBox* nelle quali è possibile selezionare il valore desiderato fra un insieme di valori disponibili. Per il rendimento dei pannelli sono stati messi a disposizione i valori interi fra 15% e 20% compresi. Si è ritenuto non necessario analizzare dei valori al di fuori di questi siccome sarebbero risultati irrealistici.

L'intervallo di valori scelti per la superficie dei pannelli fotovoltaici è compreso fra i valori di 3.000 m² e di 10.000 m². Il valore massimo di superficie si è fissato a 10.000 m² per limiti fisici ovvero la superficie della petroliera è di 19.977 m² e per limiti di ingombro dei pannelli si è fissato che non si può avere più del 50% della superficie totale della petroliera.

I valori di questa simulazione sono riportati in due fogli. Il primo foglio “Simulazione3” è composto da una tabella con la stessa struttura di quella presente in “CarichiOrari” che è riportata in figura 3.7. Nella tabella di “Simulazione3” vengono riportati i valori complessivi delle potenze per ogni ora del mese, perciò non vengono riportati i valori delle potenze assorbite o erogate dal singolo componente. Nella tabella presente nel secondo foglio “BilancioSim3” vengono riportati i valori parziali di ciascun componente e la somma dei valori relativi è uguale al valore complessivo.

Successivamente verranno analizzati i risultati dei quattro mesi, nei quali non verranno riportati tutti i grafici, ma verranno riportati solo quelli di un caso preso come riferimento. Questa scelta è dettata da due motivi, primo per la ripetitività dei risultati e secondo a causa dello spazio. Per vedere tutti i grafici di ogni caso vedere l'appendice A.

3.3.9.3.1 GENNAIO

Nel mese di gennaio si ha il percorso dal porto di Dalian a quello di Aden, e questo è stato analizzato modificando il rendimento e la superficie. I risultati consumi in litri di combustibile usati per alimentare il motore durante la navigazione sono stati tabellati e sono visibili nella tabella 3.4.

		Rendimento [%]						
		[litri]	15	16	17	18	19	20
Superficie [m ²]	3.000	148.253	147.488	146.676	146.676	145.911	145.864	
	4.000	145.864	145.051	144.287	143.880	142.304	142.256	
	5.000	142.662	142.256	141.396	140.225	139.461	138.649	
	6.000	140.225	139.413	138.242	137.837	136.668	136.266	
	7.000	138.195	137.026	136.265	135.003	134.652	133.085	
	8.000	136.266	135.005	134.201	133.043	131.836	130.683	
	9.000	134.199	133.043	131.432	130.635	129.036	128.303	
	10.000	131.879	130.683	128.658	128.303	127.103	125.536	

Tabella 3.4 Consumo di combustibile nel mese di gennaio

Dalla tabella 3.4 si vede che i litri consumati diminuiscono, a parità di rendimento, all'aumentare della superficie dei pannelli fotovoltaici, e a parità di superficie diminuisce all'aumentare del rendimento. Il valore minimo di combustibile usato corrisponde infatti per una superficie di 10.000 m² e con un rendimento del 20 %. Questo risultato era aspettato siccome aumentando l'energia che possono erogare i pannelli fotovoltaici diminuisce l'energia che i motori dovranno fornire per il soddisfacimento delle richieste della nave.

Concentrandosi sui consumi specifici invece non si hanno gli stessi risultati ottenuti nella tabella 3.4, anzi con un'ottica puramente basata sull'analisi dei consumi specifici si ha che il risultato con più alto consumo specifico, che quindi rappresenta il valore meno desiderato, è proprio quando si ha una superficie di 10.000 m² e un rendimento del 20%. Con questi parametri dei pannelli si ha un consumo specifico di 197,42584 g/kWh.

		Rendimento [%]						
		[g/kWh]	15	16	17	18	19	20
Superficie [m ²]	3.000	197,19603	197,19603	197,19603	197,19614	197,19603	197,19603	
	4.000	197,19603	197,19605	197,19605	197,19605	197,19606	197,19624	
	5.000	197,19605	197,19624	197,19606	197,19606	197,19608	197,19650	
	6.000	197,19606	197,19620	197,19655	197,19797	197,20071	197,20570	
	7.000	197,19717	197,19977	197,20490	197,21120	197,22160	197,23703	
	8.000	197,20570	197,21384	197,22575	197,24448	197,26175	197,28966	
	9.000	197,22330	197,24448	197,26603	197,28888	197,32838	197,37749	
	10.000	197,25542	197,28966	197,30013	197,41368	197,40811	197,42584	

Tabella 3.5 Tabella consumi specifici medi del mese di gennaio

I consumi specifici tendono ad aumentare all'aumentare del rendimento e della superficie, questa tendenza è causata dal fatto che con tali parametri si raggiungono potenze erogate dai

pannelli molto elevate. Facendo riferimento all'immagine 3.48 si vede che le potenze superano il valore di 800 kW che ricordo essere il limite di carica della batteria, facendo questo ha come secondo e unico altro destinatario la nave. Una potenza troppo alta dai pannelli nel caso in cui sia maggiore del limite di carica della batteria ma minore della potenza richiesta dalla nave va a peggiorare i consumi specifici all'interno del motore diesel, questo siccome l'energia che non può essere data alla batteria va a soddisfare la richiesta della nave che però comporta l'abbassamento del carico del motore diesel e quindi andando a diminuire il rendimento e di conseguenza aumentando il consumo specifico.

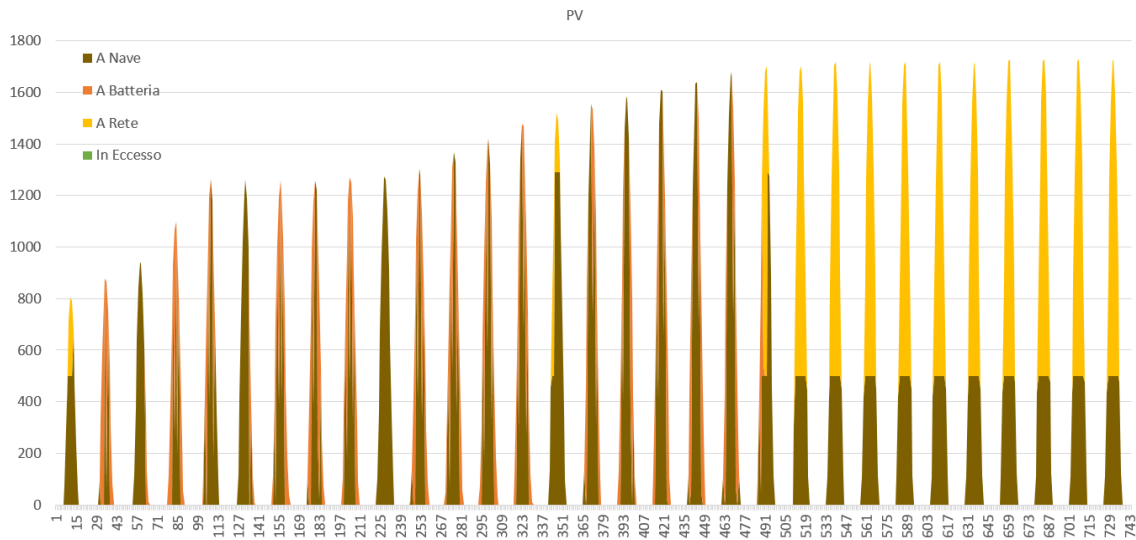


Figura 3.48 Potenza erogata dai pannelli fotovoltaici nel mese di gennaio [kW - ore]

Per interezza nella tabella 3.6 vengono riportati i rendimento medio mensile di gennaio al variare dei due parametri peculiari dei pannelli fotovoltaici.

		Rendimento [%]					
		15	16	17	18	19	20
Superficie [m ²]	[%]	15	16	17	18	19	20
	3.000	42,7539	42,7539	42,7539	42,7539	42,7539	42,7539
	4.000	42,7539	42,7539	42,7539	42,7539	42,7539	42,7539
	5.000	42,7539	42,7539	42,7539	42,7539	42,7539	42,7538
	6.000	42,7539	42,7539	42,7538	42,7535	42,7529	42,7518
	7.000	42,7537	42,7531	42,7520	42,7506	42,7484	42,7451
	8.000	42,7518	42,7501	42,7475	42,7435	42,7398	42,7338
	9.000	42,7480	42,7435	42,7388	42,7340	42,7256	42,7152
10.000	42,7411	42,7338	42,7316	42,7152	42,7087	42,7050	

Tabella 3.6 Rendimenti medi mensili del mese di gennaio del motore diesel

Nonostante il fatto di un leggero aumento del consumo specifico e di una riduzione del rendimento del motore il risparmio in litri del combustibile è molto elevato. Rispetto il caso standard che era caratterizzato da un rendimento del 42,7537 %, da un consumo specifico

medio di 197,19693 g/kWh e da un consumo di 149.926 litri si ha un risparmio di 24.390 litri che corrisponde ad un risparmio del 16,3% del combustibile. Per non avere una riduzione del rendimento ed un aumento dei consumi specifici basterebbe usare una batteria che abbia un limite di carica idoneo al *surplus* generato dai pannelli fotovoltaici.

La richiesta della nave, visibile in figura 3.49, verrà soddisfatta con una distribuzione dei carichi visibile in figura 3.50.

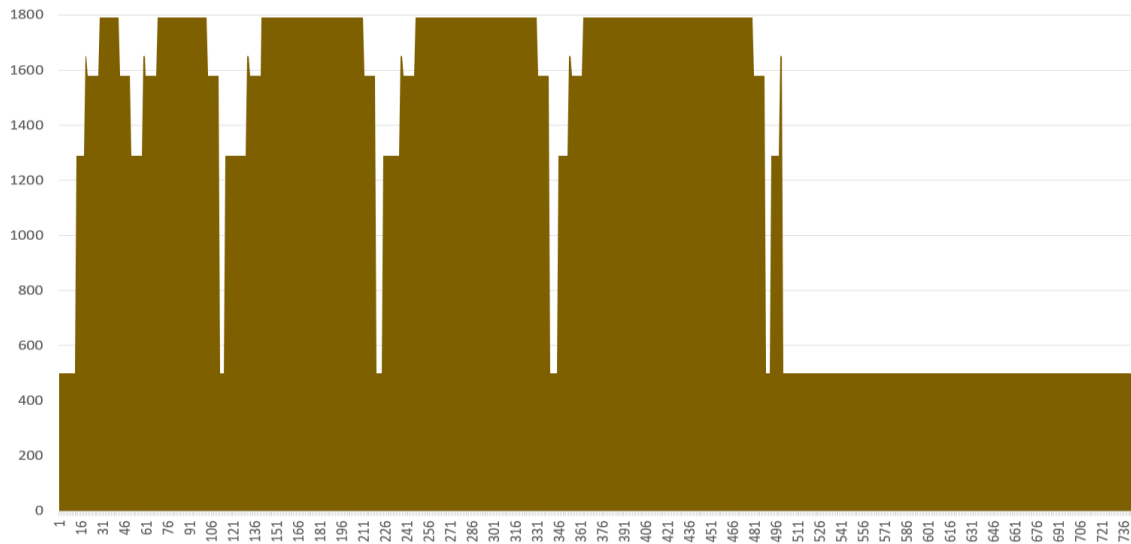


Figura 3.49 Richiesta della nave nel mese di ottobre [kW - ore]

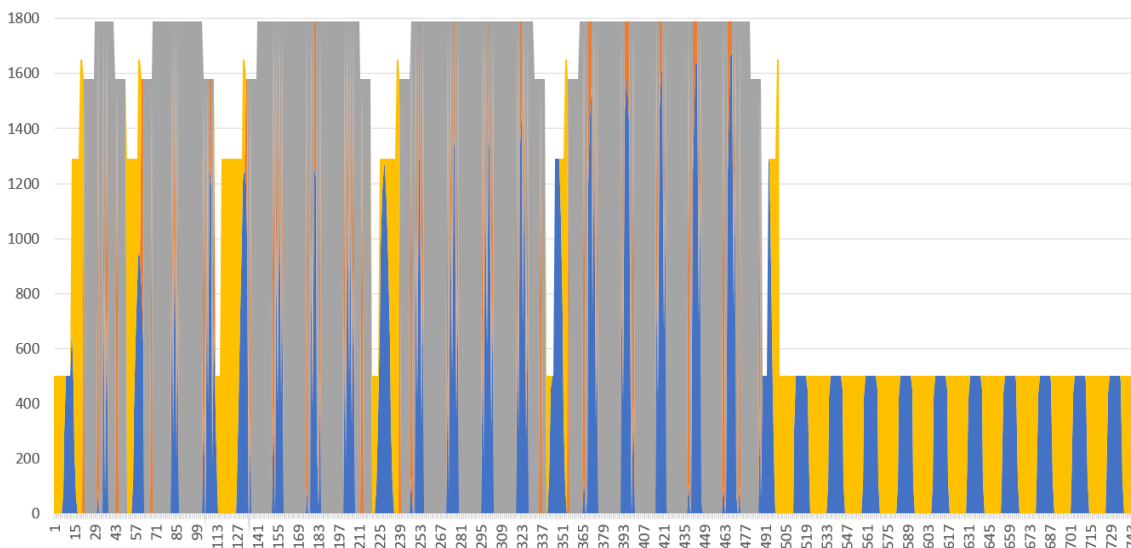


Figura 3.50 Potenza erogata alla nave nel mese di ottobre [kW - ore]

Nella figura 3.50 salta all'occhio che il contributo dei pannelli fotovoltaici è decisamente maggiore sia durante la fase di navigazione che durante quella di fermo in porto.

Nella fase di navigazione si ha che i pannelli soddisfano i carichi della nave assieme ad un contributo minore della batteria. Proprio grazie a questa collaborazione riescono a erogare energia anche durante la navigazione a massima velocità.

Il diagramma delle potenze della batteria, che è riportato nella figura 3.51, fa notare immediatamente il maggior contributo della batteria in fase di scarica grazie ad un maggior contributo dell'energia solare. La batteria nella simulazione 3 con un rendimento del 20% e una superficie di 10.000 m² funziona per 86 ore, questo significa, che si ha un calo delle ore in cui il motore diesel è funzionante da 378 a 318 ore.

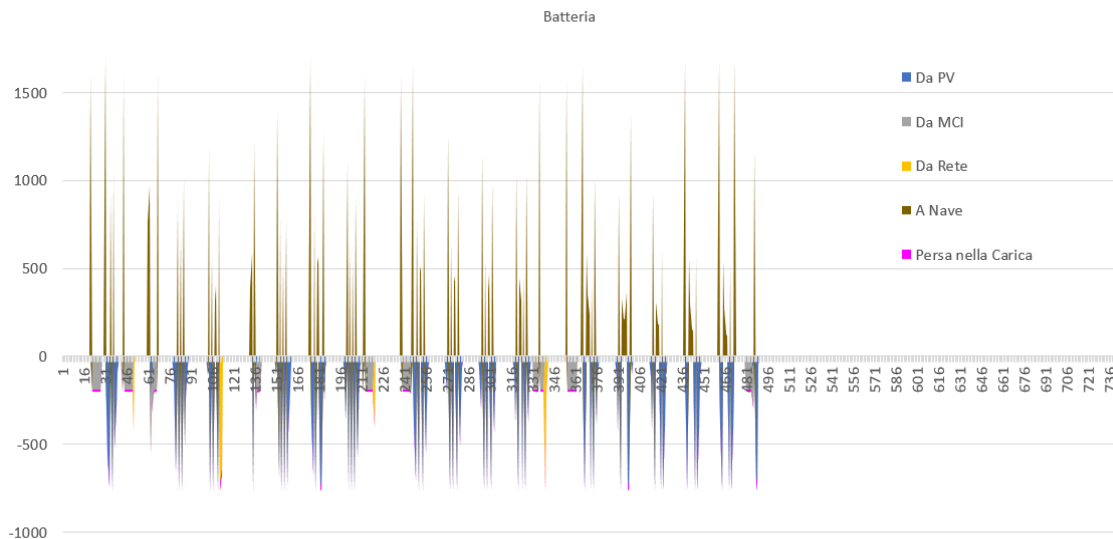


Figura 3.51 Potenza scambiata dalla batteria nel mese di gennaio [kW – ore]

Durante il periodo di fermo in porto l'energia prodotta dai pannelli è maggiore di quella richiesta dalla nave, così rendendo possibile l'immissione dell'energia in eccesso nella rete terrestre. In figura 3.52 è riportato l'andamento temporale della rete elettrica nella quale succede un qualcosa di indesiderato. Nel periodo di stazionamento nel porto di destinazione si alternano intervalli in cui si vende energia elettrica ed intervalli in cui la si compra, questo per quando rappresenti un miglioramento dal caso standard, non rappresenta il caso più economicamente vantaggioso. Il prezzo dell'elettricità fra quando la si compra rispetto a quando la si vende, nello stesso istante di tempo, differisce degli oneri, ovvero i costi che vengono aggiunti all'interno del prezzo dell'energia elettrica per compensare i costi di gestione della rete e delle perdite nel trasporto.

Nel nostro caso il *gap* fra il prezzo di vendita e quello di acquisto è minore siccome l'energia elettrica immessa avviene durante il giorno che è caratterizzato da prezzi maggiori, mentre l'acquisto dell'elettricità dalla rete avviene durante la notte che è sempre caratterizzata da dei prezzi inferiori.

Ciò che si vorrebbe è che tutta l'energia prodotta in eccesso dai pannelli durante il giorno fosse disponibile durante la notte.

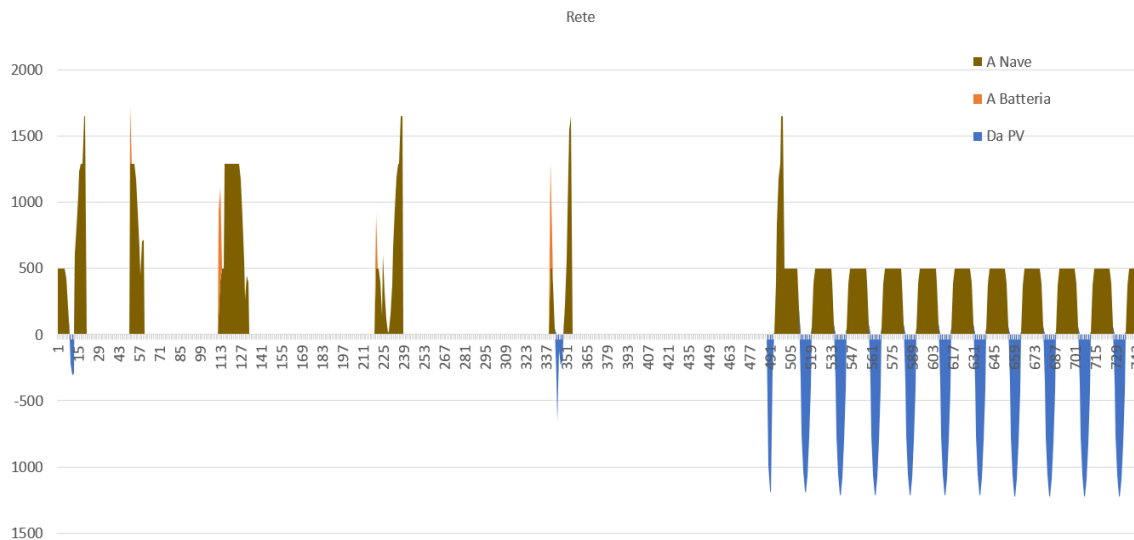


Figura 3.51 Potenza della rete nel mese di gennaio [kW – ore]

Prendendo in analisi il primo giorno al porto di Aden si hanno i seguenti valori:

$$\text{EnergiaEccessoPV} = 6.745 \text{ kWh}$$

$$\text{EnergiaNave} = 6.910 \text{ kWh}$$

$$\text{EnergiaBatteria} = \text{EnergiaEccessoPV} * \text{RendimentoCarica} = 6.407,75 \text{ kWh}$$

$$\text{EnergiaRete} = \text{EnergiaNave} - \text{EnergiaBatteria} = 502,15 \text{ kWh}$$

Con la possibilità di immagazzinare l'energia in eccesso dai pannelli per ricaricare una batteria durante il giorno, la quale invece si scaricherà durante la notte per soddisfare il carico della nave, si potrebbe acquistare solamente 502,15 kWh rispetto i 6.910 kWh.

Il problema è che per poterlo fare occorrerebbe un accumulatore con una capacità di almeno 9.154 kWh, considerando che lo stato di carica non possa scendere al di sotto del 30%.

3.3.9.3.2 APRILE

Nel mese di aprile verranno riportati i risultati ottenuti con un rendimento del 19% e una superficie di 8.000 m². Il mese di aprile ha un tragitto che parte da Aden e va fino a Dalian.

Nella tabella 3.7 sono riportati i rendimenti medi del motore nel mese di aprile, si nota che il rendimento ha la stessa tendenza del mese di gennaio, ovvero che tende a calare all'aumentare della superficie dei pannelli fotovoltaici e all'aumentare anche del rendimento. Le ragioni per cui si hanno piccole variazioni del rendimento del motore diesel sono le stesse esposte nel mese di gennaio, ovvero la potenza dai pannelli aumenta il suo contributo e nel caso in cui ci si trova in navigazione durante il giorno si ha che si potranno avere due casi, il primo è che non riuscendo a erogare sufficiente energia per soddisfare il carico della nave viene impiegata per la ricarica della batteria se necessario, nel secondo se la potenza prodotta dai pannelli supera il limite di carica della batteria la frazione che non può essere destinata alla batteria viene indirizzata alla nave. Questa dinamica fa sì che si abbassi la potenza che il motore deve erogare perciò andando ad intaccare il rendimento.

		Rendimento [%]					
Superficie [m ²]	[%]	15	16	17	18	19	20
	3.000	42,7539	42,7539	42,7539	42,7538	42,7539	42,7539
	4.000	42,7539	42,7539	42,7539	42,7539	42,7539	42,7538
	5.000	42,7539	42,7538	42,7538	42,7537	42,7535	42,7530
	6.000	42,7537	42,7533	42,7526	42,7517	42,7503	42,7478
	7.000	42,7522	42,7511	42,7479	42,7442	42,7392	42,7340
	8.000	42,7478	42,7440	42,7396	42,7331	42,7247	42,7171
	9.000	42,7396	42,7331	42,7241	42,7155	42,7080	42,6991
	10.000	42,7262	42,7171	42,7056	42,6991	42,7013	42,6937

Tabella 3.7 Rendimenti medi mensili del mese di aprile del motore diesel

Nella seconda tabella del mese di aprile, che è la tabella 3.8, vengono riportati i consumi specifici medi del mese in questione. Al contrario della tabella 3.7 i consumi specifici aumentano all'aumentare della superficie e del rendimento.

		Rendimento [%]					
Superficie [m ²]	[g/kWh]	15	16	17	18	19	20
	3.000	197,19603	197,19604	197,19604	197,196304	197,19618	197,19604
	4.000	197,19604	197,19608	197,19606	197,196121	197,19606	197,19637
	5.000	197,19606	197,19637	197,19637	197,196808	197,19817	197,20049
	6.000	197,19681	197,19865	197,20227	197,206375	197,21265	197,22423
	7.000	197,20384	197,20900	197,22372	197,241043	197,26421	197,28856
	8.000	197,22423	197,24193	197,26236	197,292938	197,33214	197,36816
	9.000	197,26253	197,29294	197,33517	197,375427	197,41104	197,45332
	10.000	197,32520	197,36816	197,42252	197,453323	197,44281	197,47937

Tabella 3.8 Tabella consumi specifici medi del mese di aprile

Analizzando infine i risultati sul combustibile che si riesce a risparmiare per ogni combinazione fra superficie e rendimento si osserva che, come nel mese di gennaio, la quantità minima di combustibile viene usata con la combinazione di un rendimento del 20% e con una superficie di 10.000 m². In questo mese cambiando questi due parametri dal valore standard a quelli ottimali si riesce a ridurre il consumo del combustibile di 30.437 litri, ovvero si ha una riduzione del 20,49%.

		Rendimento [%]					
Superficie [m ²]	[litri]	15	16	17	18	19	20
	3.000	146.867	145.600	145.242	145.194	144.071	143.259
	4.000	143.259	142.494	141.682	141.180	140.010	139.651
	5.000	140.368	139.651	138.433	137.668	136.092	135.640
	6.000	137.668	136.093	135.235	134.067	132.900	132.143
	7.000	134.878	132.945	132.501	130.983	129.779	129.389
	8.000	132.143	130.625	129.420	128.221	127.337	125.877
	9.000	129.420	128.221	127.339	125.476	123.919	122.368
	10.000	127.381	125.877	123.974	122.368	120.376	118.102

Tabella 3.9 Consumo di combustibile nel mese di aprile

L'andamento delle potenze richieste dalla nave nel mese di aprile sono riportate nella figura 3.52, mentre la distribuzione di come viene erogata l'energia è nella figura 3.53, si può osservare da quest'ultima figura che durante lo stazionamento nel porto di destinazione il contributo dei pannelli fotovoltaici cala, e che il *surplus* prodotto dai pannelli fotovoltaici non è sufficiente per compensare la richiesta durante il periodo notturno.

$$\text{EnergiaRichiesta} = 6.596 \text{ kWh}$$

$$\text{EnergiaEccessoPV} = 3.753 \text{ kWh}$$

$$\text{EnergiaRete} = \text{EnergiaRichiesta} - \text{EnergiaEccessoPV} = 2.843 \text{ kWh}$$

Con questi parametri dei pannelli fotovoltaici si ha che il *surplus* di energia prodotto riesce a ricoprire più del 50% della richiesta della nave, da ciò si potrebbe pensare di trovare una batteria che abbia una capacità tale da poter venire ricaricata completamente con la *EnergiaEccessoPV* partendo da una SOC del 30%. Con i valori di questo caso servirebbe una batteria con una capacità di 5.362 kWh. Al contrario del caso precedente che, date le dimensioni risulterebbe arduo il collocamento all'interno della nave a causa dell'ingombro, questa potrebbe essere posta all'interno della nave e grazie all'aumento della capacità aiuterebbe maggiormente anche durante la navigazione andando a diminuire i litri consumati dalla nave.

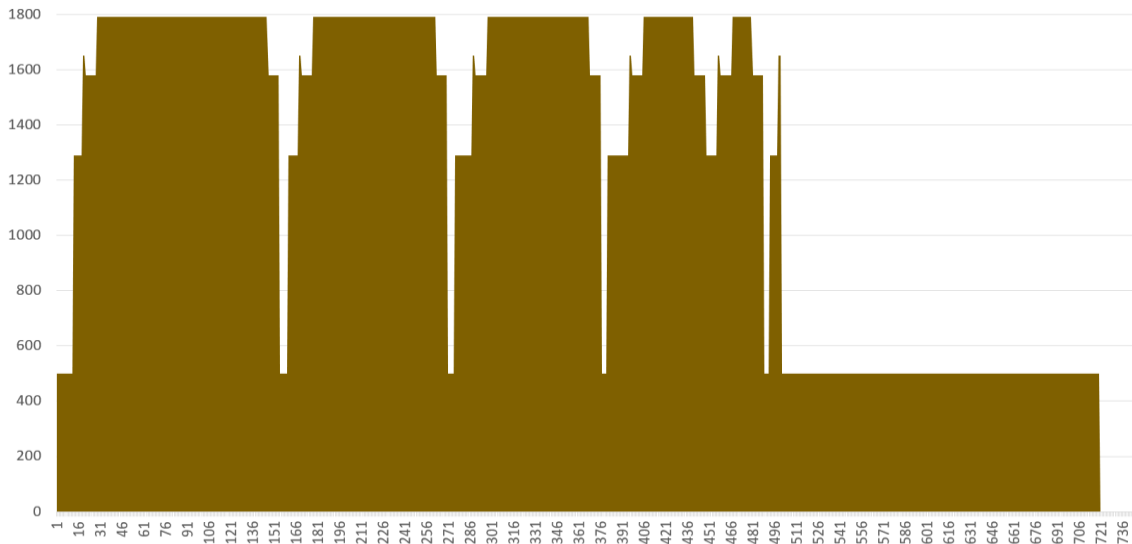


Figura 3.52 Richiesta della nave nel mese di aprile [kW - ore]

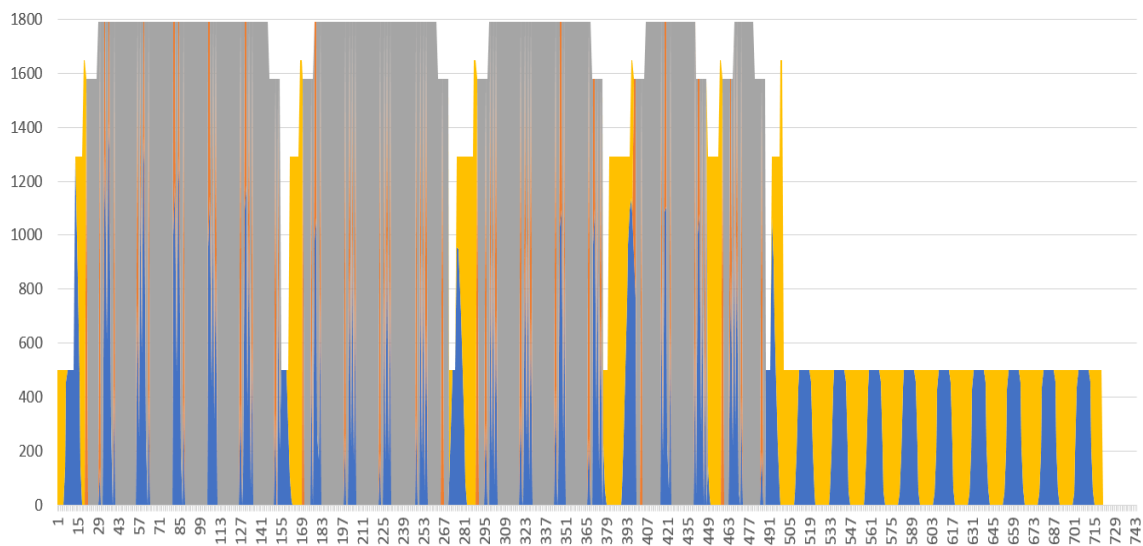


Figura 3.53 Potenza erogata alla nave nel mese di aprile [kW - ore]

Come sostegno dell'affermazione di dover aumentare la capacità della batteria si riporta il grafico della potenza della rete elettrica.

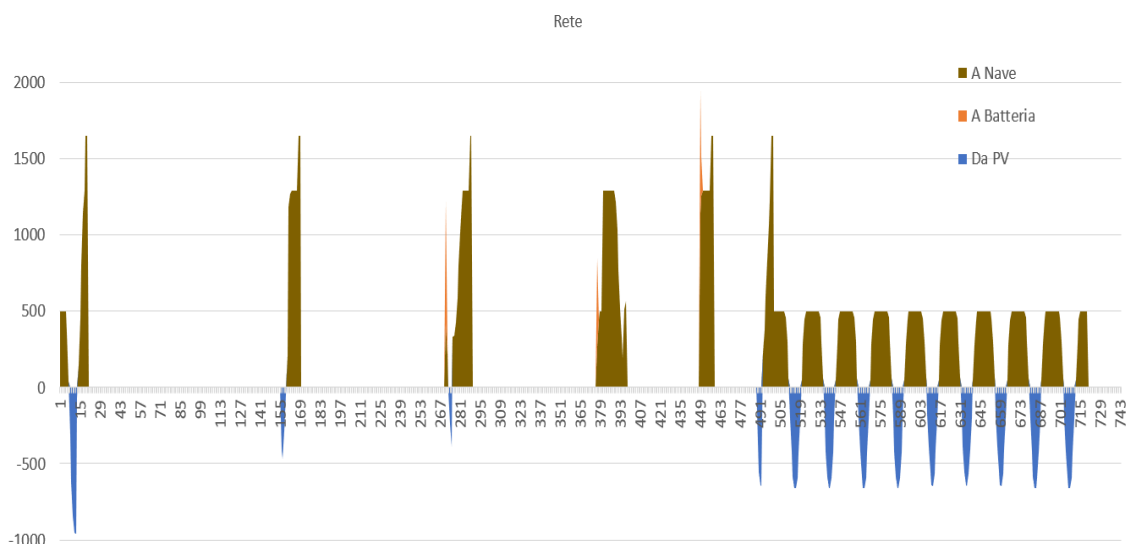


Figura 3.54 Potenza della rete nel mese di aprile [kW - ore]

Durante la navigazione la batteria riesce stare in funzione per 83 ore su 404. Un maggiore numero di ore in cui la potenza riesce a erogare energia implica un numero minore di ore in cui il motore è in funzione.

3.3.9.3.3 LUGLIO

Il mese di luglio verrà analizzato con un rendimento dei pannelli fotovoltaici del 18% e con una superficie di 6.000 m². Il tragitto di questo mese parte dal porto di Dalian arrivando alla destinazione Aden.

I consumi del combustibile, il consumo specifico e i rendimenti del motore sono tabellati nella tabella 3.9. La tendenza delle tre grandezze riportate in tabella sono le stesse degli altri due mesi precedentemente analizzati, perciò il rendimento diminuisce all'aumentare dei due parametri dei pannelli e così anche i litri di combustibile. Al contrario del rendimento, la quantità di combustibile usato lo si vuole il più piccolo possibile siccome comporta un risparmio economico per ogni tragitto fatto dalla petroliera.

Il consumo specifico varia in maniera opposta alle altre due grandezze, e si trova il valore più grande, e perciò quello meno desiderato con i valori dei parametri che minimizzano il rendimento.

Il valore del rendimento cala dal valore del caso standard di 42,7538 % al valore di 42,7024%, una riduzione del rendimento accettabile se confrontata al risparmio di 25.914 litri di carburante. Però successivamente verranno riportate, per dare una maggiore variabilità dei risultati il caso di 18% di rendimento e di 6.000 m² di superficie che, come si può vedere in tabella 3.10, sono associati ad un rendimento del motore diesel di 42,7536 % per un risparmio di combustibile del 9,12 % che corrisponde a 13.666 litri.

		Rendimento [%]						
		15	16	17	18	19	20	
Superficie [m ²]	3.000	42,7539	42,7539	42,7539	42,7538	42,7539	42,7539	
	4.000	42,7539	42,7539	42,7539	42,7539	42,7539	42,7539	
	5.000	42,7539	42,7539	42,7539	42,7539	42,7539	42,7538	
	6.000	42,7539	42,7539	42,7538	42,7536	42,7533	42,7526	
	7.000	42,7537	42,7535	42,7528	42,7516	42,7494	42,7477	
	8.000	42,7526	42,7510	42,7487	42,7453	42,7411	42,7359	
	9.000	42,7492	42,7453	42,7405	42,7345	42,7255	42,7213	
	10.000	42,7427	42,7359	42,7276	42,7213	42,7115	42,7024	
	3.000	197,19603	197,19614	197,19608	197,19633	197,19603	197,19604	
	4.000	197,196045	197,19604	197,19605	197,19604	197,19618	197,19611	
	5.000	197,19623	197,19611	197,19606	197,19606	197,19618	197,19633	
	6.000	197,19606	197,19623	197,19646	197,19730	197,19891	197,20204	
	7.000	197,19681	197,19810	197,20140	197,20671	197,21687	197,22491	
	8.000	197,20204	197,20959	197,22018	197,23596	197,25546	197,27959	
	9.000	197,21793	197,23596	197,25821	197,28621	197,32851	197,34807	
	10.000	197,24812	197,27959	197,31883	197,34807	197,39491	197,43764	
	3.000	147.894	147.130	146.270	145.912	145.864	145.051	
	4.000	145.051	144.287	143.474	143.021	142.208	141.085	
	5.000	142.208	141.085	140.631	139.867	139.150	137.525	
	6.000	139.867	139.102	137.478	136.260	135.544	134.686	
	7.000	137.478	135.902	135.092	134.235	132.307	131.500	
	8.000	134.686	133.831	132.261	131.459	130.253	129.051	
	9.000	132.260	131.459	130.208	129.055	127.911	125.939	
	10.000	130.296	129.051	127.953	125.939	124.798	124.012	

Tabella 3.10 Valori medi del mese di luglio di rendimento, consumo specifico e combustibile [% , g/kWh, litri]

Nelle figure 3.55 e 3.56 sono riportati rispettivamente l'andamento temporale della richiesta della nave e la distribuzione delle potenze nel sistema motore ibrido-rete durante tutto il mese di luglio.

Dalla figura 3.56 si vede che con i parametri dei pannelli fotovoltaici di questa analisi riescono a contribuire al soddisfacimento della richiesta della nave durante il periodo di fermo in porto, ma che non è sufficiente per poter caricare la batteria se eventualmente venisse scaricata per fornire energia alla nave durante l'assenza dell'irraggiamento.

L'energia in eccesso è di 10.263 kWh durante tutto il periodo di ormeggio ad Aden, tale valore rappresenta la scarica completa della batteria per 5 volte. Siccome la batteria riesce a essere ricaricata usando la potenza prodotta in eccesso dai pannelli in due giorni, allora si potrebbe porre che la batteria venga ricaricata solamente dai pannelli in questo arco di tempo, così da non usare la rete per farlo. La ricarica della rete con questa logica risulterebbe economicamente dannosa siccome si assorbirebbe dalla rete elettricità per ricaricare la batteria, nella quale è

presente un rendimento di carica, per poi fornirla alla nave. Il risparmio che si otterrebbe con questa logica sarebbe molto minore rispetto ai casi precedenti.

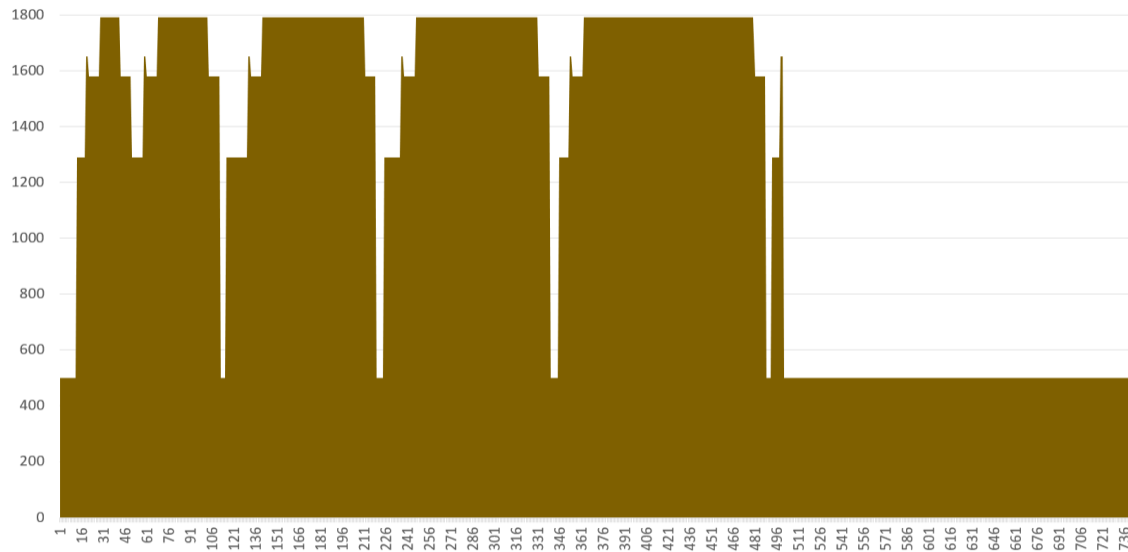


Figura 3.55 Richiesta della nave nel mese di luglio [kW - ore]

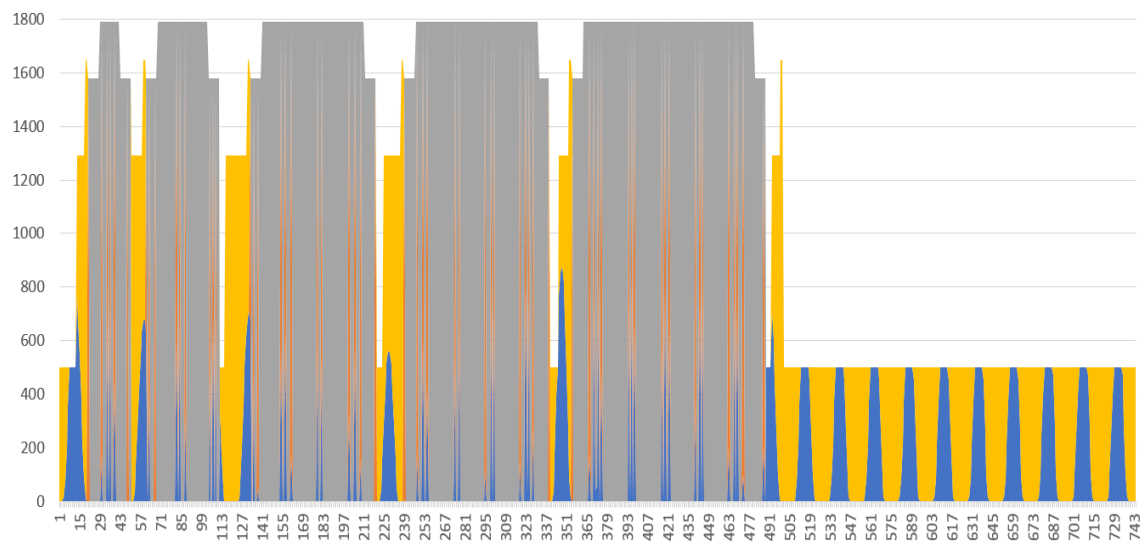


Figura 3.56 Potenza erogata alla nave nel mese di luglio [kW - ore]

Il contributo della batteria, a causa di una ricarica più lenta dovuta a un rendimento e una superficie minori, diminuisce rispetto al caso analizzato nel mese di aprile, in particolare sarà in funzione per 60 ore che rappresentano il 14,9 % della navigazione. Il grafico della batteria è riportato nella figura 3.57.

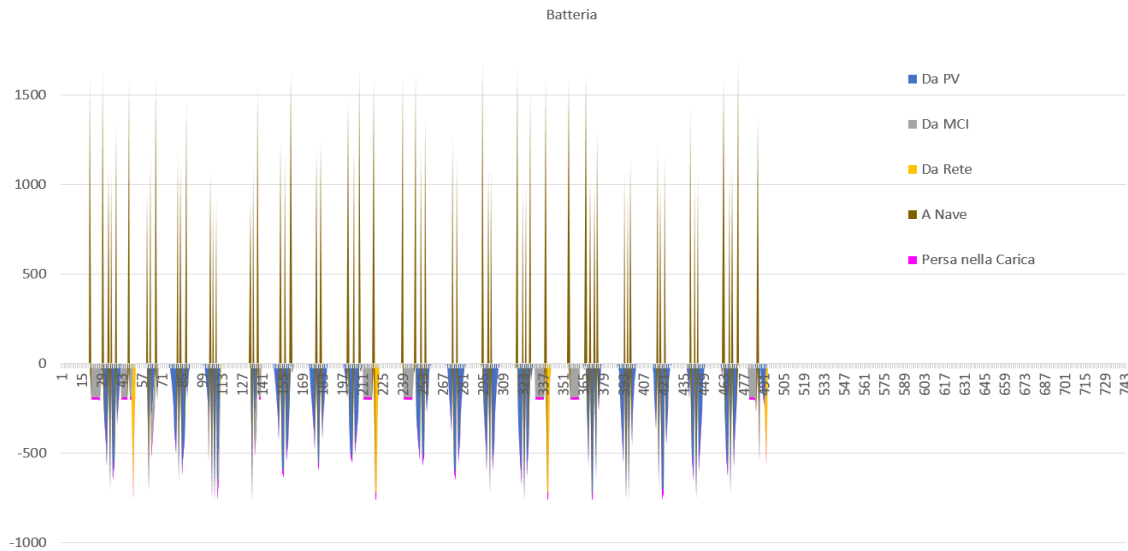


Figura 3.57 Potenza scambiata dalla batteria nel mese di luglio [kW – ore]

3.3.9.3.4 OTTOBRE

I grafici del mese di ottobre verranno analizzati con un rendimento dei pannelli del 17% e con una superficie di 4.000 m². Il tragitto consiste nel percorso da Aden a Dalian e a causa dei valori dei parametri fissati abbiamo che l'energia prodotta dai pannelli venga ridotta riconducendoci ad un caso più prossimo al caso standard. Dalla figura 3.58 è riportata il grafico della potenza dei pannelli nel tempo, dal quale si vede che la voce "A Rete" è presente solo nel primo picco e successivamente non si ha più la cessione di energia dai pannelli fotovoltaici alla rete elettrica.

L'abbassamento dei valori delle potenze prodotte dai pannelli fa sì che, nel periodo di stazionamento nel porto di Dalian sarà sempre necessario prelevare dell'energia elettrica dalla rete, come si può vedere nella figura 3.59.

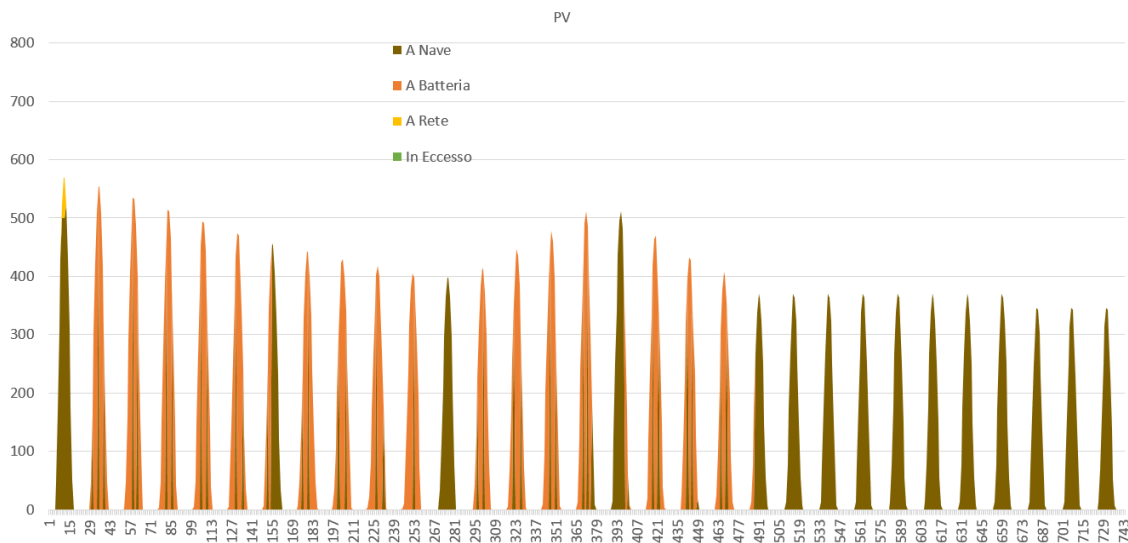


Figura 3.58 Potenza erogata dai pannelli fotovoltaici nel mese di ottobre [kW – ore]

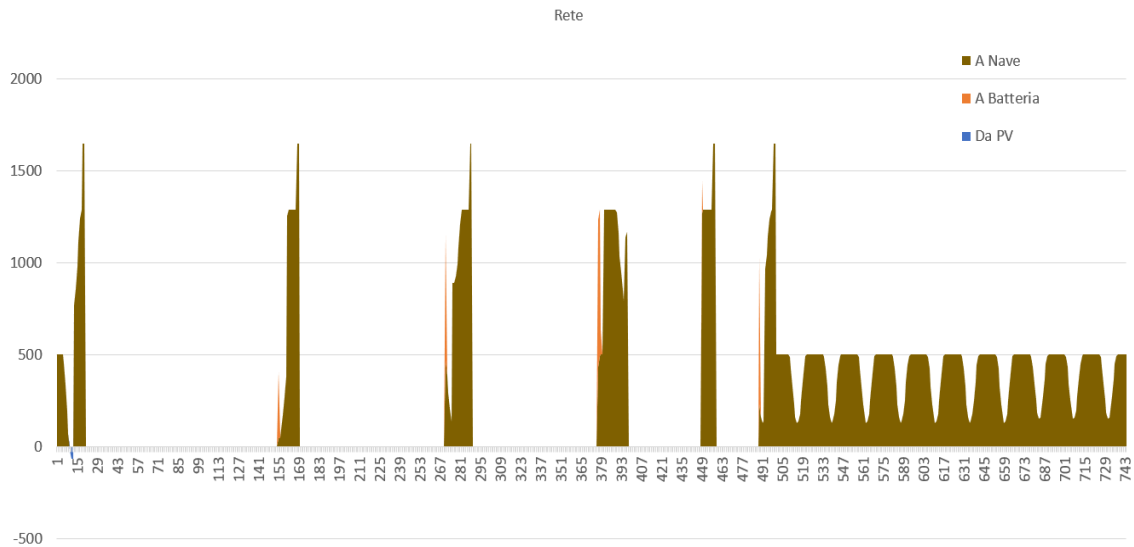


Figura 3.59 Potenza della rete nel mese di ottobre [kW – ore]

Nella figura 3.60 viene riportato il grafico della potenza richiesta dalla nave.

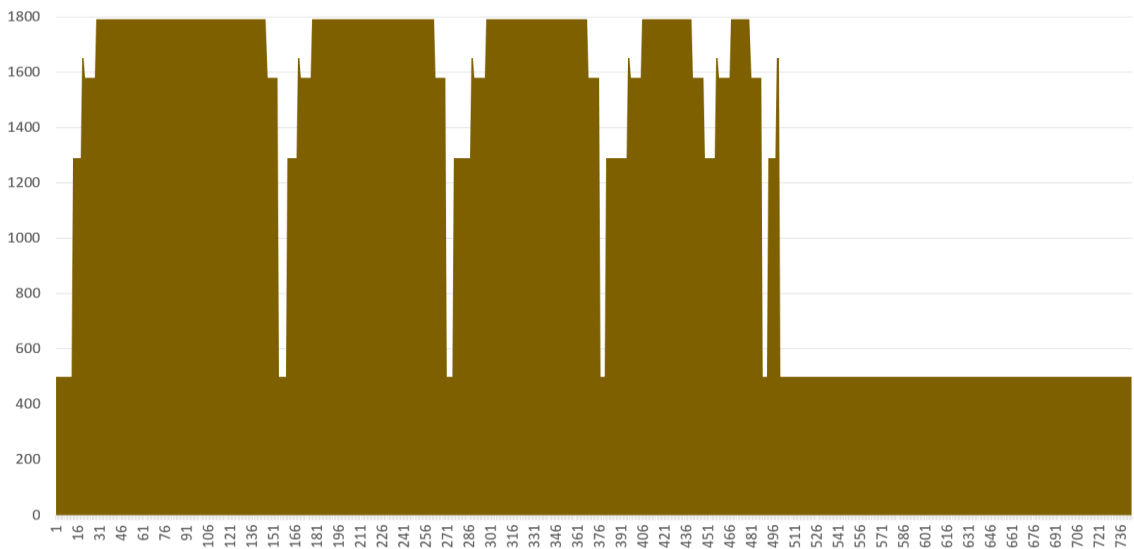


Figura 3.60 Richiesta della nave nel mese di ottobre [kW – ore]

Dalla figura 3.61 si vede che la distribuzione delle potenze è analoga al caso standard con unica differenza che l'energia con provenienza dai pannelli è maggiore nei periodi di fermo in porto e con un maggiore contributo anche della batteria durante il periodo di navigazione. Negli intervalli fra un porto ed un altro si ha che la batteria riesce a scaricarsi anche durante la navigazione in massima velocità, ovvero con una richiesta della nave di 1.790 kW.

Nella tabella 3.11 sono riportati i valori medi mensile del rendimento del motore diesel, dei consumi specifici e dei litri di combustibile usati dal motore.

		Rendimento [%]						
		15	16	17	18	19	20	
Superficie [m ²]	3.000	42,7539	42,7539	42,7539	42,7539	42,7539	42,7539	
	4.000	42,7539	42,7539	42,7539	42,7539	42,7539	42,7538	
	5.000	42,7539	42,7538	42,7539	42,7538	42,7537	42,7536	
	6.000	42,7538	42,7536	42,7535	42,7533	42,7526	42,7515	
	7.000	42,7533	42,7526	42,7518	42,7505	42,7483	42,7451	
	8.000	42,7515	42,7493	42,7462	42,7419	42,7382	42,7323	
	9.000	42,7475	42,7419	42,7363	42,7305	42,7244	42,7154	
	10.000	42,7399	42,7323	42,7231	42,7154	42,7030	42,7013	
	3.000	197,19612	197,19612	197,19603	197,19605	197,19604	197,19600	
	4.000	197,19604	197,19605	197,19605	197,19606	197,19606	197,19640	
	5.000	197,19606	197,19635	197,19615	197,19643	197,1969	197,19750	
	6.000	197,19643	197,19728	197,19785	197,19884	197,20198	197,20720	
	7.000	197,19899	197,20224	197,20561	197,21173	197,22192	197,23690	
	8.000	197,20720	197,21735	197,23193	197,25176	197,26904	197,29640	
	9.000	197,22586	197,25176	197,27800	197,30522	197,33342	197,37620	
	10.000	197,26106	197,29645	197,33981	197,37624	197,43526	197,44390	
	3.000	147.320	147.273	146.460	145.648	145.242	144.883	
	4.000	144.883	144.023	143.617	142.494	142.088	141.682	
	5.000	142.446	141.682	140.822	139.293	138.433	138.075	
	6.000	139.293	138.433	137.215	136.045	135.593	134.832	
	7.000	136.858	136.000	134.831	133.353	132.500	131.745	
	8.000	134.832	133.309	132.195	131.301	130.141	128.988	
	9.000	132.144	131.301	130.147	128.946	127.433	126.290	
	10.000	130.184	128.988	127.796	126.290	125.107	122.769	

Tabella 3.11 Valori medi del mese di ottobre di rendimento, consumo specifico e combustibile [% , g/kWh, litri]

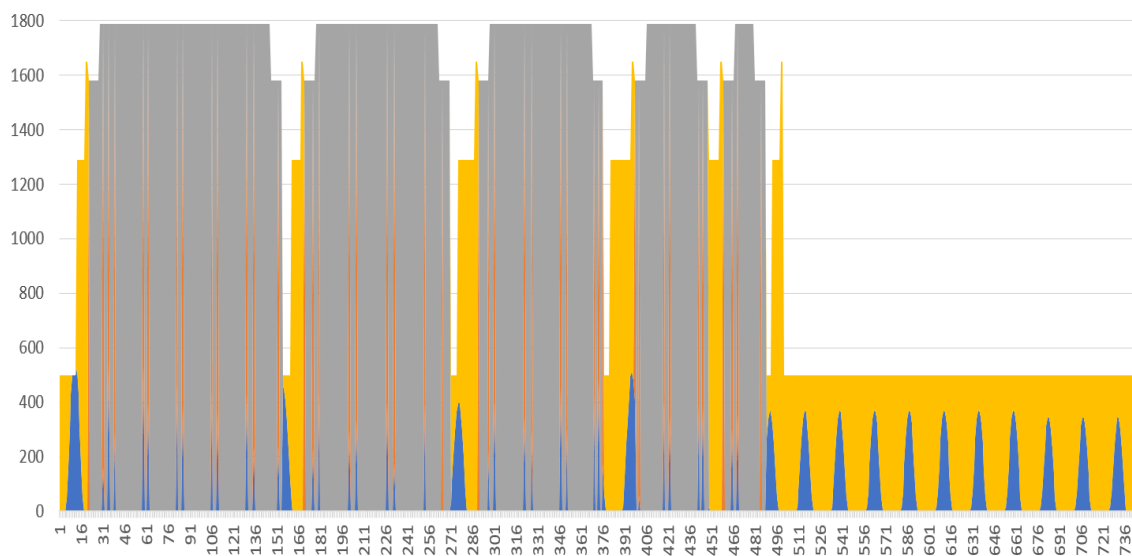


Figura 3.61 Potenza erogata alla nave nel mese di ottobre [kW – ore]

Con un contributo dell'energia solare del genere si ha che il dimensionamento della batteria risulta idoneo, siccome il rendimento medio mensile del mese mantiene lo stesso valore del caso standard di 42,7539 %, che significa che nella fase di navigazione la potenza prodotta dai pannelli non va mai ad eccedere la potenza limite di carica della batteria. Un aumento della superficie dei pannelli fa sì che però diminuiscano i litri del combustibile che si riducono di 5.997 litri.

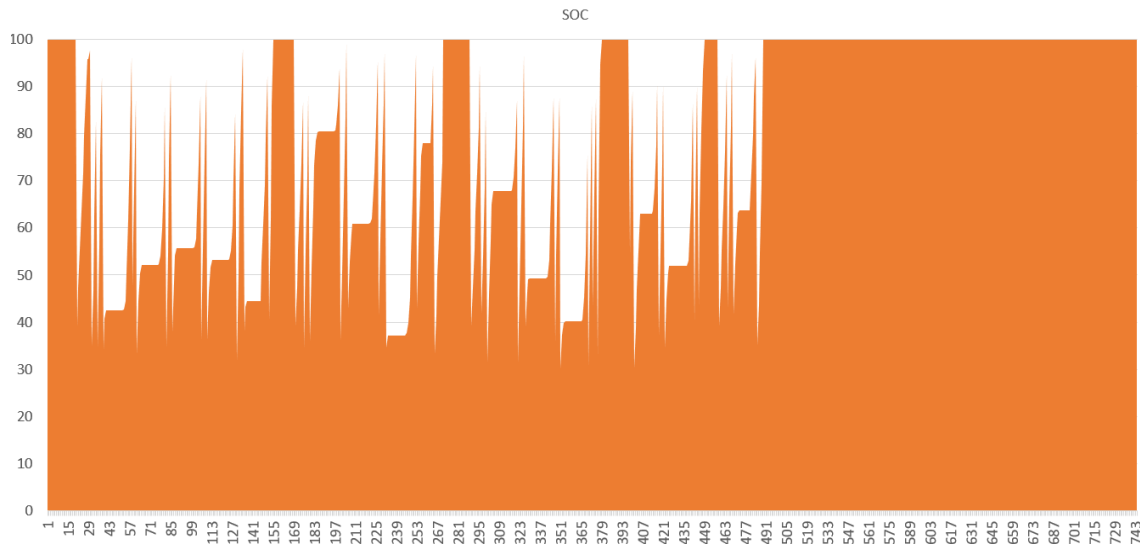


Figura 3.62 Andamento temporale della SOC nel mese di ottobre

Con i valori ottenuti con il 17% di rendimento e 4.000 m² di superficie non serve modificare la capacità della batteria o prevedere la presenza di una batteria nella banchina per accumulare l'energia prodotta in eccesso dai pannelli fotovoltaici e perciò non serve modificare la logica del codice creato.

3.3.9.3.5 CONCLUSIONI DELLA SIMULAZIONE 3

Per approfondire i risultati ottenuti in questa simulazione si consiglia di consultare l'appendice A nella quale sono presenti tutti i grafici ottenuti.

In questa simulazione si è trovato il risultato che per andare a minimizzare il consumo di combustibile durante la navigazione la combinazione ottimale è quella di avere un rendimento e superficie dei pannelli più grande possibile, però a valori maggiori dei parametri associati ai pannelli deve seguire un dimensionamento idoneo della batteria. Nella simulazione appena svolta si ottiene che l'aumento dei due parametri dei pannelli comporta un abbassamento del rendimento medio in cui opera il motore diesel e di conseguenza un aumento del consumo specifico medio, per evitarlo bisogna far sì che la batteria abbia un limite di carica idoneo per poter ricevere la potenza dei pannelli.

In aggiunta ad un aumento del limite di carica della batteria presente nella nave bisogna prevedere una batteria sulla banchina per poter accumulare l'energia prodotta in eccesso dai pannelli nel periodo di stazionamento nel porto di destinazione.

Per il dimensionamento della batteria che sarebbe necessaria nella banchina del porto di Dalian dev'essere fatto nel mese di giugno siccome è il mese in cui si ha un maggiore eccesso della produzione dell'energia elettrica dai pannelli. Nel mese di giugno per non immettere energia elettrica nella rete durante il giorno si dovrebbe avere una batteria con capacità 9.819 kWh, però i carichi della nave sono minori e perciò per soddisfarli per tutta l'assenza di irraggiamento serve 8.353 kWh con la restante parte di energia che verrà immessa nella rete.

Per dimensionare la batteria nel porto di Aden bisogna farlo nel mese di gennaio che è quello in cui il *surplus* di energia prodotta dai pannelli fotovoltaici è massimo. La capacità della batteria necessaria per accumulare tutta l'energia che arriverebbe dai pannelli è di 12.833 kWh, però considerando l'energia necessaria alla nave nel periodo notturno si vede che ci sarebbe una sovradimensione della batteria visto che per soddisfare il carico della nave nel periodo notturno servirebbe una batteria con una capacità di 9.842 kWh. La differenza fra queste due capacità rappresenta l'energia che verrebbe immessa in rete creando un utile senza però doverla ricomprare durante la notte.

3.3.9.4 SIMULAZIONE 4

La quarta simulazione si basa sul modificare la capacità della batteria entro un certo *range* che va dal caso di assenza della batteria fino a quella con il valore di 5.000 kWh, perciò si va a modificare il caso standard agendo solamente sulla batteria. In particolare si può simulare il caso standard nel caso in cui non ci fosse la batteria dandoci una percezione su quanto influisca tale componente sul consumo specifico, sul rendimento del motore e sui litri di combustibile.

Nella logica di questa simulazione si è dovuto aggiungere una condizione per prevedere l'assenza della batteria, questo siccome nel codice originale si otteneva un errore di calcolo a causa della presenza nei denominatori della variabile *EnergiaTotaleBatteria* che risulta nulla siccome legata alla capacità della batteria.

Nel caso in cui la capacità sia nulla il codice risulta molto semplificato siccome viene a mancare la necessità di dover calcolare l'aggiornamento della SOC e tutte le verifiche per aumentare il carico del motore e per rendere idonei i valori di ricarica della batteria.

La simulazione 4 viene richiamata all'interno del codice nel caso in cui selezioni un valore della *ListBox* "Capacità Batteria" che è stato aggiunto nello *UseForm* "PotenzePerOgniOraMese". Nel caso in cui non si selezioni le due pagine legate alla simulazione 4, che sono "Simulazione 4" e "BilancioSim4", resteranno vuote.

A seguito delle simulazioni svolte nei mesi presi a campione si è visto che la capacità influenza i parametri che si sono scelti per confrontare i risultati ottenuti. La prima nota da fare è che la capacità della batteria, con le grandezze in gioco in questa simulazione, non dà nessun contributo per i valori di 1.500 kWh, 1.000 kWh, 500 kWh e 0 kWh. Per questi valori la SOC non riesce mai a erogare dell'energia siccome sottodimensionata, infatti in tutti i mesi si avranno i grafici della batteria e della SOC come quelli presenti in figura 3.63 e 3.64.

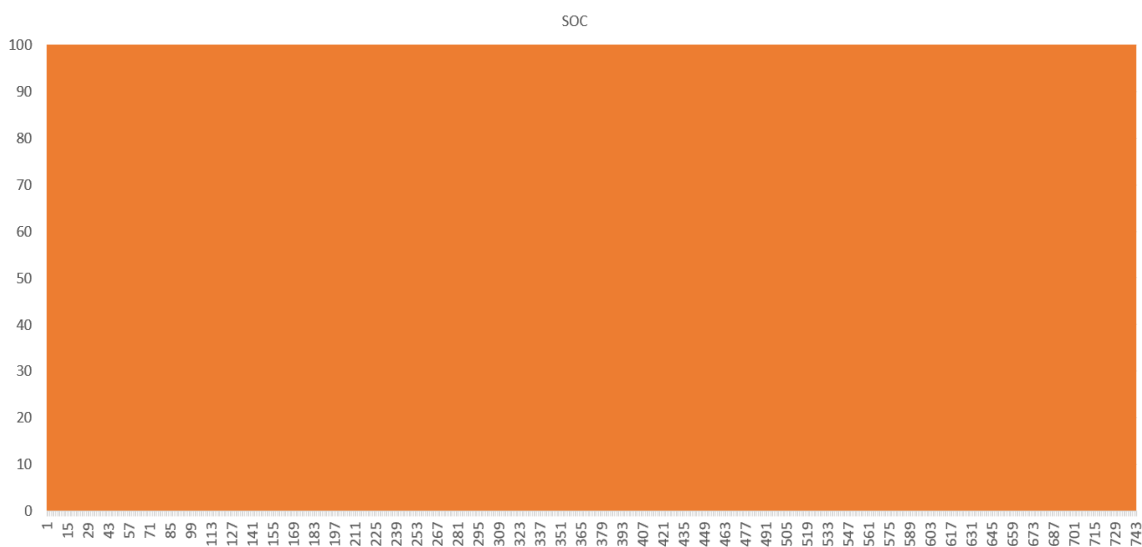


Figura 3.63 Grafico della SOC per la capacità di 500 kWh, 1.000 kWh e 1.500 kWh

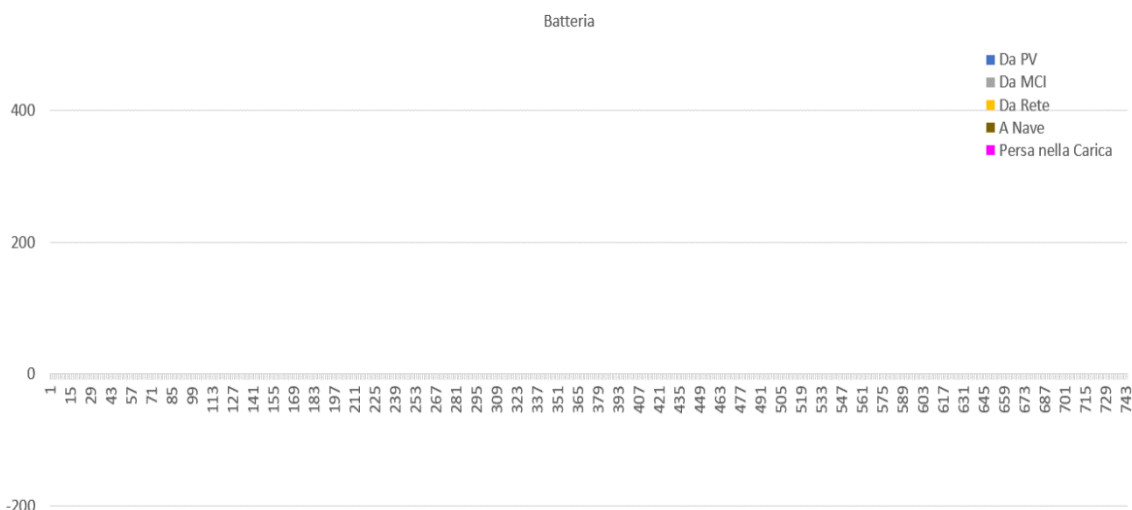


Figura 3.64 Grafico della potenza assorbita/erogata dalla batteria per capacità di 500 kWh, 1.000 kWh e 1.500 kWh

Una seconda osservazione è che per valori troppo grandi della SOC i pannelli non sono in grado di ricaricare mai la batteria fino al 100% prima che si scarichi. Una dinamica del genere significa che la batteria è sovradimensionata per il suo utilizzo durante la navigazione.

3.3.9.4.1 GENNAIO

Nel mese di gennaio verranno riportati solo i grafici con una capacità di 5.000 kWh, anche se si cercheranno di analizzare tutti i risultati più rilevanti.

In tabella 3.12 vengono riportati i valori di rendimento del motore diesel, di consumo specifico ed i litri consumati dal motore diesel stesso.

		Rendimento [%]	Consumo specifico [g/kWh]	Combustibile [litri]
Capacità [kWh]	0	42,6890	197,49649	160.099
	500	42,6890	197,49649	160.099
	1.000	42,6890	197,49649	160.099
	1.500	42,6890	197,49649	160.099
	2.000	42,6975	197,45720	159.353
	2.500	42,7539	197,19618	149.925
	3.000	42,7539	197,19601	150.068
	3.500	42,7539	197,19601	149.567
	4.000	42,7539	197,19603	148.850
	4.500	42,7539	197,19603	148.085
	5.000	42,7539	197,19603	148.133

Tabella 3.12 Valori del rendimento del motore, del suo consumo specifico e dei litri di combustibile nel mese di gennaio

Dalla tabella 3.12 si vede che i litri consumati del motore diesel sono uguali per valori da 0 kWh a 1.500 kWh, questo è dovuto al fatto che la batteria non riesce mai a erogare energia alla nave, da ciò si deduce che la capacità della batteria è sottodimensionata per il suo scopo. Per capacità maggiori di 1.500 kWh il combustibile tende a diminuire dato che il contributo della batteria aumenta man mano diminuendo di conseguenza il numero delle ore in cui il motore diesel è in funzione.

Confrontando i valori ottenuti del rendimento medio mensile del motore si vede che si raggiunge il valore di rendimento di design per un valore della capacità di 2.500 kWh, ne consegue che la capacità risulta non essere più sottodimensionata per il suo scopo e che quindi la potenza dei pannelli viene direzionata completamente alla batteria senza che una sua parte venga destinata alla richiesta della nave.

Analizzando però il consumo specifico medio del mese di gennaio si evidenzia che il valore minimo lo si ottiene solo nei casi di 3.000 kWh e 3.500 kWh che hanno un valore di 197,19601 g/kWh, mentre per capacità maggiori si ottengono dei consumi specifici di 197,19603 g/kWh.

Ne consegue che a livello specifico converrebbe uno fra i due casi con consumo specifico più basso ed in particolare fra i due sarebbe più vantaggiosa la capacità di 3.500 kWh siccome ha un consumo di combustibile minore rispetto al caso di 3.000 kWh. Non considerando la piccolissima differenza fra i consumi specifici dei casi con capacità maggiore di 2.500 kWh si ha che converrebbe il caso di 4.500 kWh siccome è quello in cui si ha un minor consumo di combustibile.

Successivamente verranno riportati i risultati con una capacità di 5.000 kWh.

Il grafico della richiesta della nave nel mese di gennaio è ripartato nella figura 3.65.

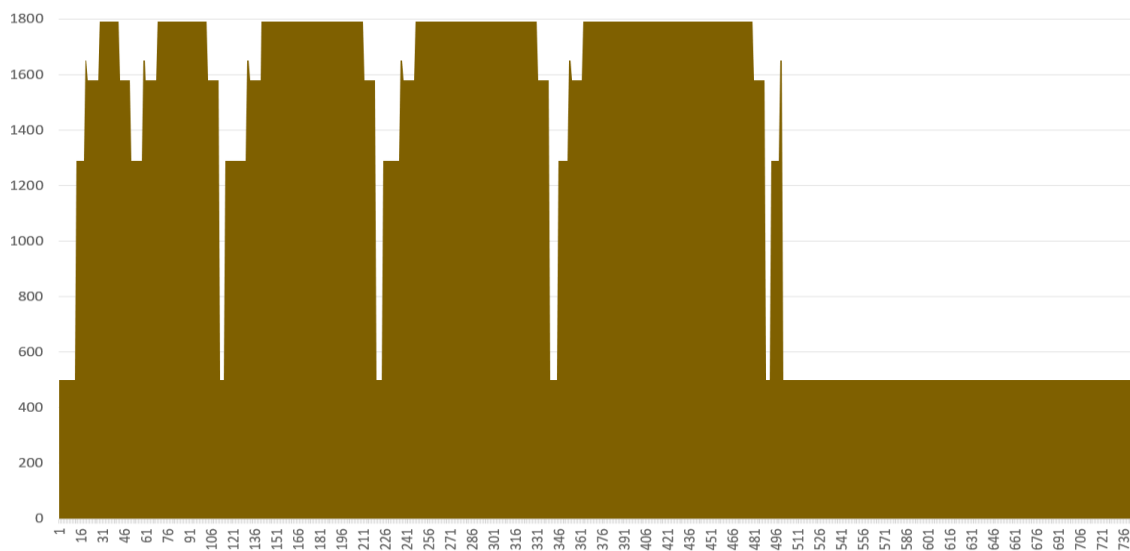


Figura 3.65 Richiesta della nave nel mese di gennaio [kW - ore]

Il grafico della potenza erogata dal sistema motore ibrido-rete elettrica è riportato nella figura 3.66 e differisce dal grafico 3.65 a causa di errori di approssimazione nei calcoli, che sono presenti a causa del processo esposto nel paragrafo “problema della carica della batteria”. I valori delle potenze erogate differiscono dal valore richiesto dalla nave con un errore assoluto orario minore di $\pm 7,24792 \text{ E-}05$, commettendo un errore assoluto in tutto il mese $\pm 0,012916937$

kWh, mentre l'errore relativo orario è minore del $1,02997E-05$ ed invece l'errore relativo mensile è di $1,38664E-06$.

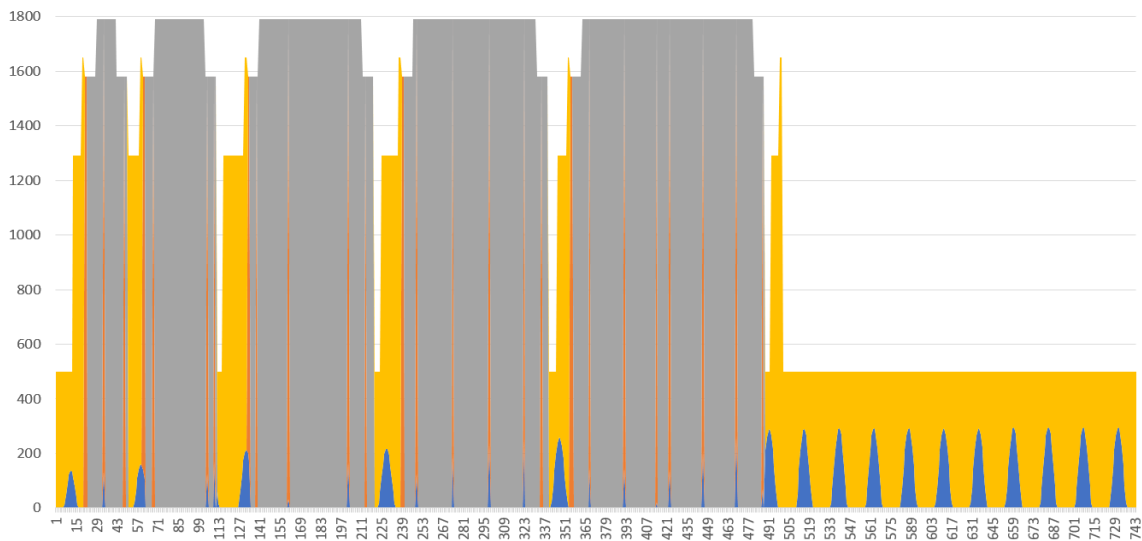


Figura 3.66 Potenza erogata alla nave nel mese di gennaio [kW – ore]

Il contributo della batteria lo si vede nella figura 3.67, in particolare si vede che le ore in cui la batteria eroga energia sono 31, ricordando che nel caso standard si erano ottenute 26 ore in cui è in funzione la batteria. Da questo si deduce che raddoppiare la capacità comporta solo un incremento di 5 ore, contributo poco rilevante considerando il maggior costo della batteria ed inoltre considerando anche il numero di ore di navigazione, che sono 404.

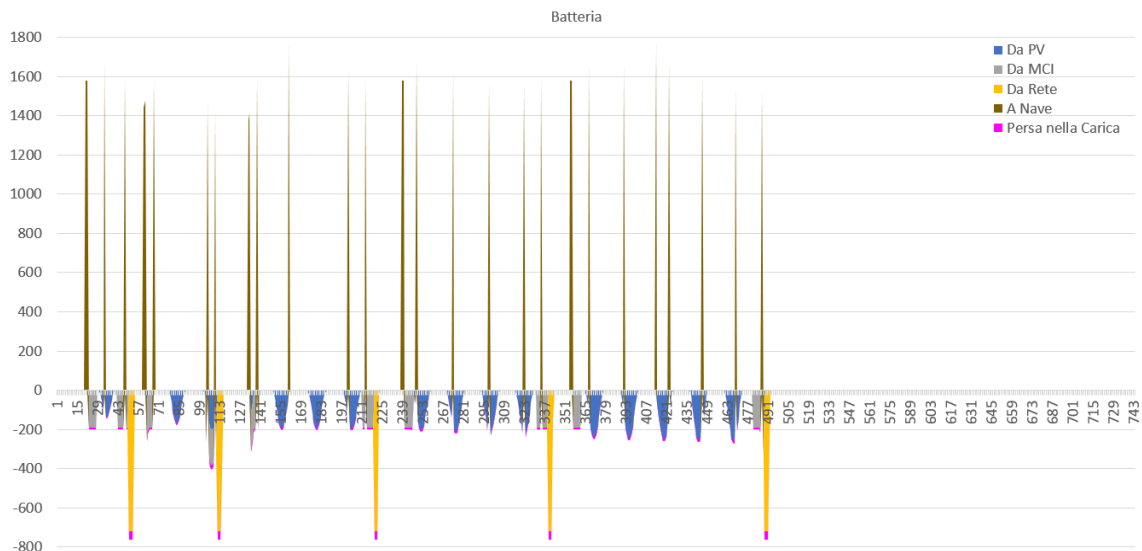


Figura 3.67 Potenza scambiata dalla batteria nel mese di gennaio [kW – ore]

Andando ad analizzare il grafico della SOC, che è riportato in figura 3.68, si osserva che il valore di SOC della batteria risulta essere sempre basso, in particolare si ha la sua scarica a seguito del suo superamento del valore di 60%. Il restante 40% non venendo usato mai durante il periodo di navigazione, esclusa la prima scarica dopo aver lasciato il porto, risulterebbe una spesa maggiore ingiustificata.

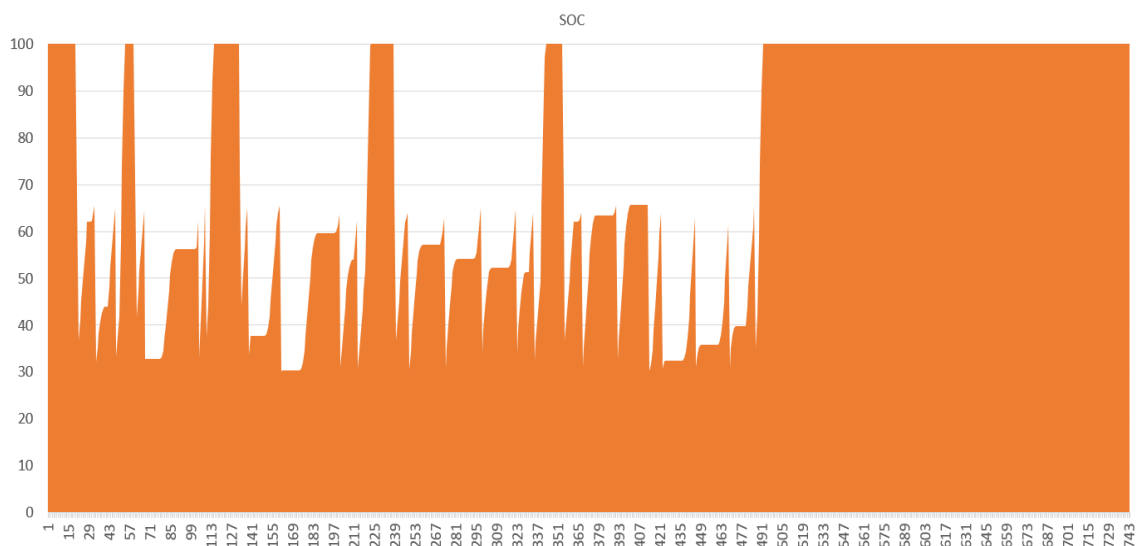


Figura 3.68 Grafico della SOC per la capacità di 5.000 kWh nel mese di gennaio

3.3.9.4.2 APRILE

Nel mese di aprile la tratta parte da Aden ed arriva a Dalian, in questo mese si riportano i risultati ottenuti con una capacità di 4.000 kWh.

Nella tabella 3.13 vengono riportati i valori di rendimento medio mensile del motore diesel, il consumo medio mensile e i litri di combustibile consumati per il mese di aprile.

		Rendimento [%]	Consumo specifico [g/kWh]	Combustibile [litri]
Capacità [kWh]	0	42,6703	197,58385	160.166
	500	42,6703	197,58385	160.166
	1.000	42,6703	197,58385	160.166
	1.500	42,6703	197,58385	160.166
	2.000	42,6952	197,46806	157.566
	2.500	42,7539	197,19623	148.539
	3.000	42,7539	197,19603	148.443
	3.500	42,7539	197,19603	148.037
	4.000	42,7539	197,19603	147.679
	4.500	42,7539	197,19603	147.726
	5.000	42,7539	197,19603	146.746

Tabella 3.13 Valori del rendimento del motore, del suo consumo specifico e dei litri di combustibile nel mese di aprile

In questo mese si osserva che i valori di rendimento e di consumo specifico massimi ottenibili si hanno per valori di capacità maggiori di 3.000 kWh, però confrontando i litri di combustibile consumati, la soluzione che va ad usare il meno possibile il motore diesel è quella con una capacità di 5.000 kWh.

I grafici di potenza richiesta dalla nave durante il mese di aprile con il grafico della potenza erogata per soddisfare i carichi della nave combaciano a meno di errori assoluti e relativi

ammissibili. La richiesta della nave viene riportata nel grafico della figura 3.69, mentre la potenza erogata alla nave la si vede nella figura 3.70.

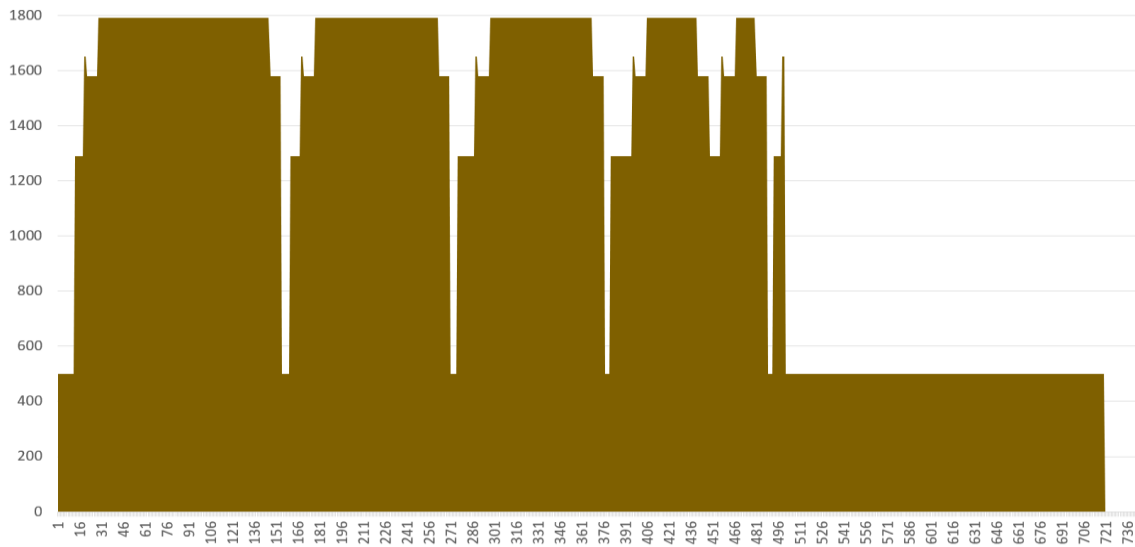


Figura 3.69 Richiesta della nave nel mese di aprile [kW - ore]

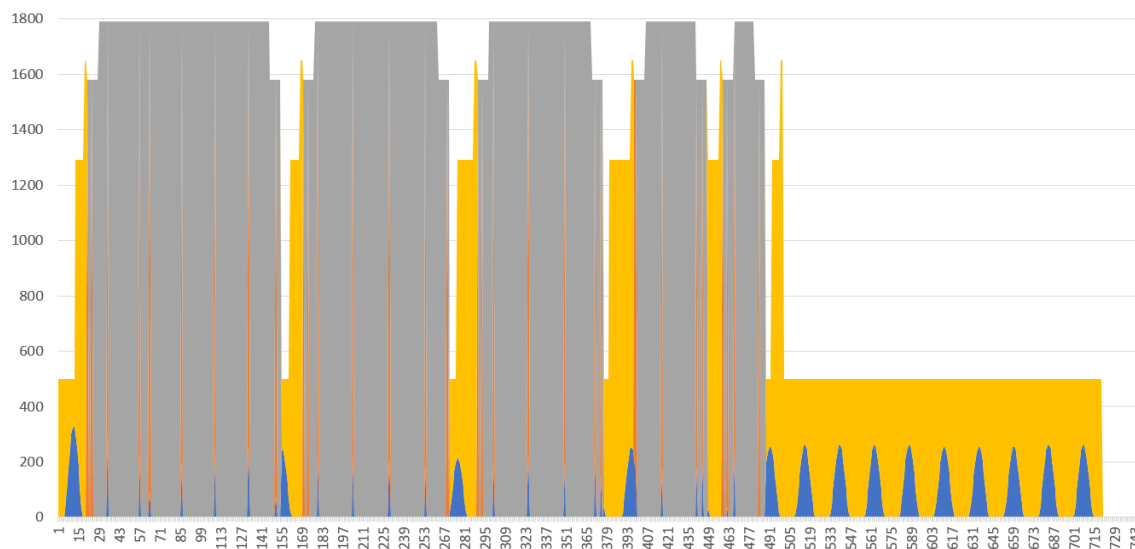


Figura 3.70 Potenza erogata alla nave nel mese di aprile [kW - ore]

La logica nella distribuzione delle potenze per fornire l'energia richiesta alla nave si vede che è analoga al caso standard, in particolare i pannelli fotovoltaici serviranno principalmente per ricaricare la batteria durante la navigazione e nelle ore di scarica della batteria a dare un contributo per raggiungere la potenza richiesta della nave. Durante il periodo in fermo in porto i pannelli contribuiranno ad abbassare l'energia elettrica presa dalla rete, in maniera complementare la rete serve a fornire l'energia alla nave che i pannelli non sono in grado di fornire.

Il motore diesel è il componente che interviene solo nel caso in cui non è possibile nessun'altra combinazione soddisfare la richiesta della nave.

Con la capacità di 4.000 kWh si ottiene che delle 404 ore di navigazione il motore diesel riesce ad essere spento solamente per 32 ore, portando ad un aumento minimo rispetto alle 30 ore del caso standard. Il grafico della batteria è riportato in figura 3.71, nel quale si può vedere che la ricarica della batteria è principalmente dovuta ai pannelli siccome il motore riesce a ricaricare la batteria solo nelle poche ore in cui opera sotto il carico di navigazione regolare. I picchi fra le ricariche sono i contributi della rete quando la nave è appena arrivata in porto.

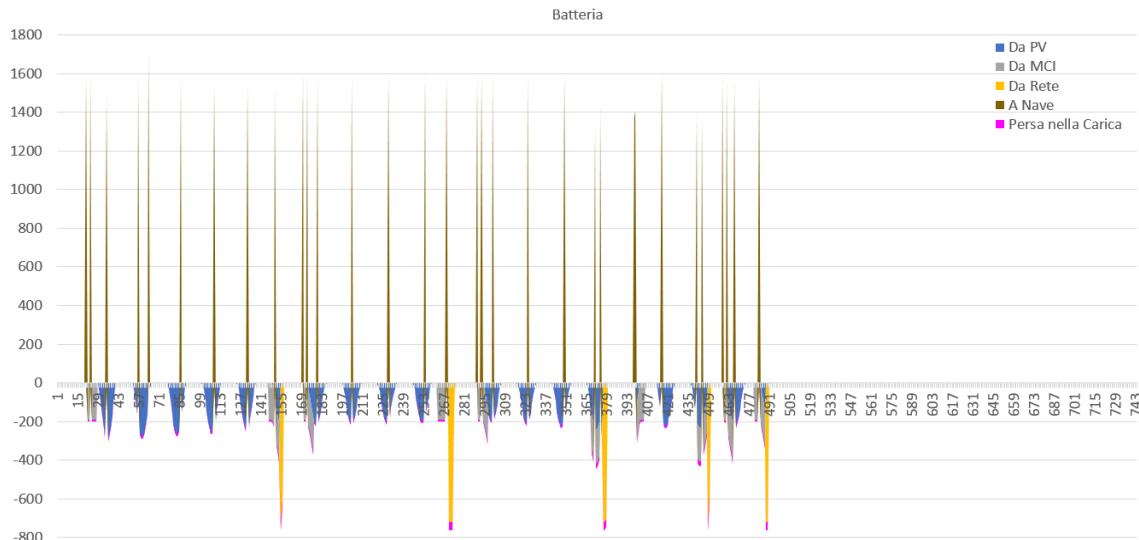


Figura 3.71 Potenza scambiata dalla batteria nel mese di aprile [Kw – ore]

Per comprendere se la capacità e quindi se il suo dimensionamento è corretto per la sua applicazione bisogna osservare il grafico della SOC, che è riportato per il mese di aprile in figura 3.72.

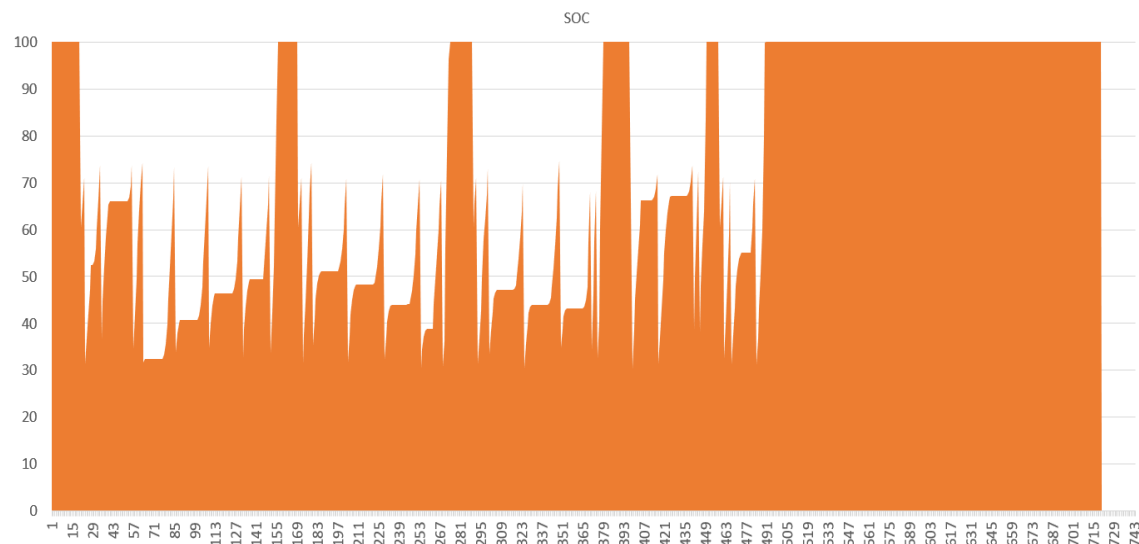


Figura 3.72 Grafico della SOC per la capacità di 4.000 kWh nel mese di aprile

Si osserva che pure questa batteria non riesce quasi mai a raggiungere la carica massima durante la navigazione, infatti oscilla fra la condizione di batteria scarica e il 70%. Però si vede che la batteria in questo caso risulta essere più idonea rispetto al caso di 5.000 kWh.

3.3.9.4.3 LUGLIO

Nel mese di luglio verranno riportati i grafici con una capacità di 3.500 kWh e il tragitto della nave parte dal porto di Dalian mentre la sua destinazione è il porto di Aden. I valori dei parametri connessi al motore nel mese di luglio sono riportati nella tabella 3.14 in funzione della capacità.

		Rendimento [%]	Consumo specifico [g/kWh]	Combustibile [litri]
Capacità [kWh]	0	42,6863	197,50897	160.109
	500	42,6863	197,50897	160.109
	1.000	42,6863	197,50897	160.109
	1.500	42,6863	197,50897	160.109
	2.000	42,6994	197,44838	158.987
	2.500	42,7538	197,19669	149.926
	3.000	42,7539	197,19601	149.256
	3.500	42,7539	197,19603	148.850
	4.000	42,7539	197,19603	148.802
	4.500	42,7539	197,19603	148.491
	5.000	42,7539	197,19603	147.774

Tabella 3.14 Valori del rendimento del motore, del suo consumo specifico e dei litri di combustibile nel mese di luglio

In questo caso si vede che confrontando i valori ottenuti nei rendimenti i valori sono quelli desiderati per una capacità di 3.000 kWh o per valori superiori, invece confrontando i consumi specifici si vede che anche con questo parametro otteniamo lo stesso risultato, anche se c'è un'anomalia per una capacità di 3.000 kWh, dove si ha un consumo specifico leggermente inferiore.

Nel *range* di capacità scelto di analizzare si ottiene che la soluzione che fa consumare la quantità minore di combustibile è quella con capacità di 5.000 kWh.

I grafici delle potenze richieste dalla nave e di quelli fornitagli sono rispettivamente nelle figure 3.73 e 3.74.

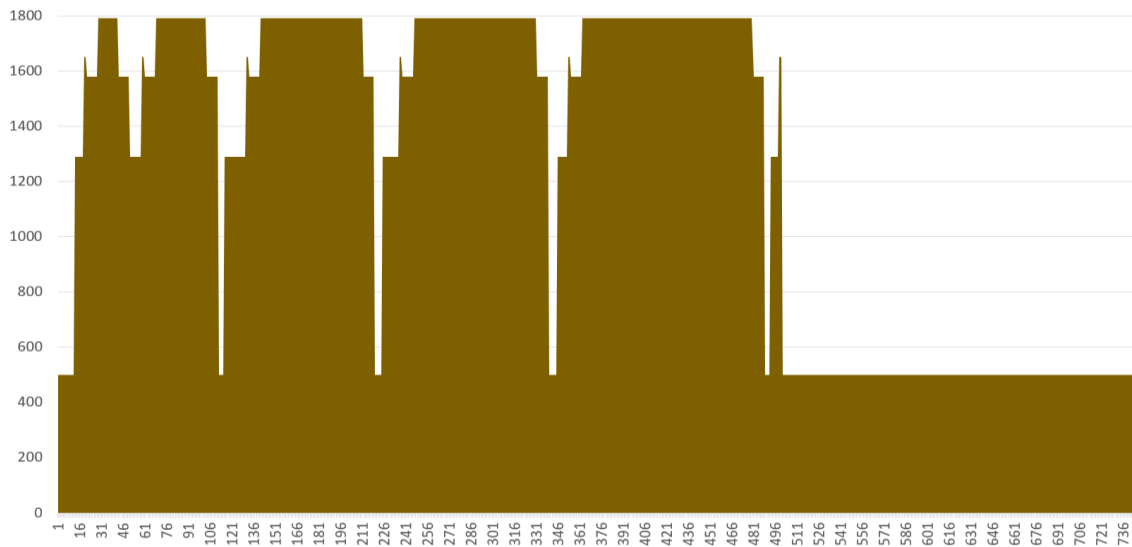


Figura 3.73 Richiesta della nave nel mese di luglio [kW - ore]

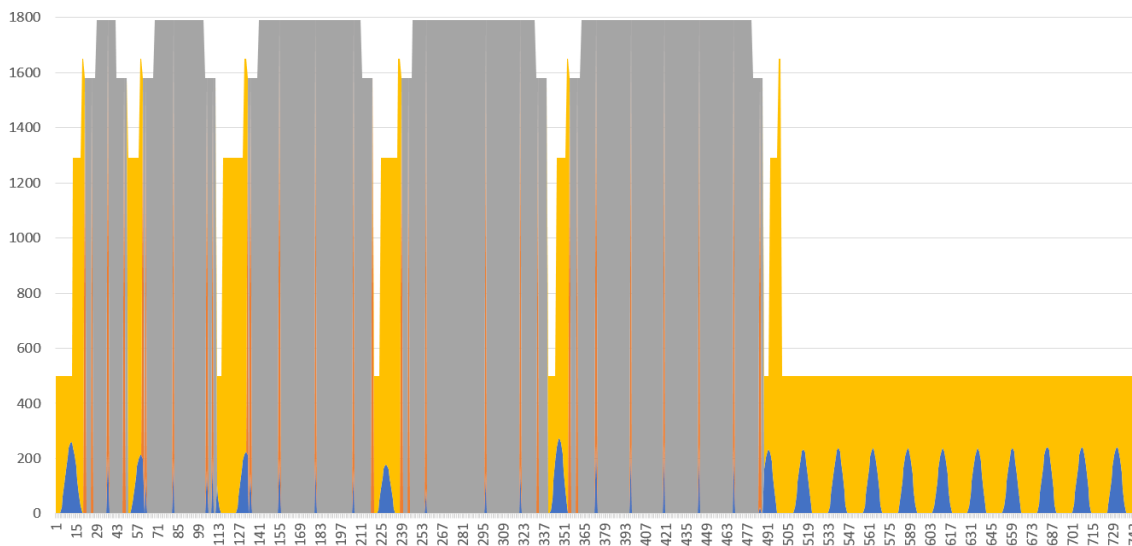


Figura 3.74 Potenza erogata alla nave nel mese di luglio [kW - ore]

La logica nel sistema del motore ibrido-rete elettrica non varia dal caso standard e dai mesi precedenti, infatti in questo mese non verranno riportati ulteriori grafici siccome risulterebbero dei risultati ripetitivi degli stessi ottenuti nei mesi precedenti.

Da evidenziare che il contributo della batteria nell'erogazione di energia si abbassa ulteriormente arrivando a 29 ore rispetto alle 27 ore ottenute con la capacità di 2.600 kWh del caso standard. L'aumento della capacità della batteria non contribuisce ad una significativa riduzione del combustibile usato nel mese.

Si ha però che la SOC, prima di scaricarsi, riuscirà a raggiungere dei valori maggiori arrivando fino a valori dell'80%.

3.3.9.4.4 OTTOBRE

Nel mese di ottobre il percorso viene compiuto partendo dal porto di Aden e arrivando al porto di Dalian e in questo mese verranno riportati i grafici ottenuti con una capacità di 3.000 kWh.

Nella tabella 3.15 sono riportati i valori peculiari del motore di rendimento, consumo specifico e combustibile.

Nella tabella si hanno i rendimenti massimi per valori di capacità di 2.000 kWh e valori superiori, mentre il valore di consumo specifico minimo lo si ottiene con una capacità di 3.000 kWh.

		Rendimento [%]	Consumo specifico [g/kWh]	Combustibile [litri]
Capacità [kWh]	0	42,6801	197,53818	160.129
	500	42,6801	197,53818	160.129
	1.000	42,6801	197,53818	160.129
	1.500	42,6801	197,53818	160.129
	2.000	42,6998	197,44658	157.908
	2.500	42,7539	197,19617	149.614
	3.000	42,7539	197,19601	149.303
	3.500	42,7539	197,19603	148.850
	4.000	42,7539	197,19603	148.491
	4.500	42,7539	197,19603	147.726
	5.000	42,7539	197,19603	147.822

Tabella 3.15 Valori del rendimento del motore, del suo consumo specifico e dei litri di combustibile nel mese di ottobre

I grafici di potenza richiesta dalla nave e di potenza erogata alla nave sono riportati rispettivamente nella figura 3.75 e 3.76.

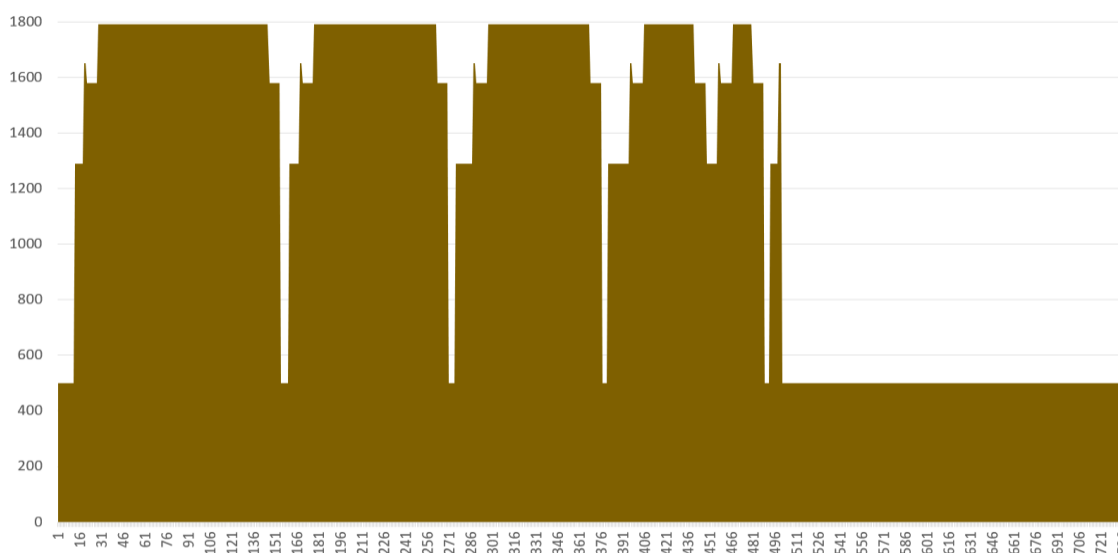


Figura 3.75 Richiesta della nave nel mese di ottobre [kW – ore]

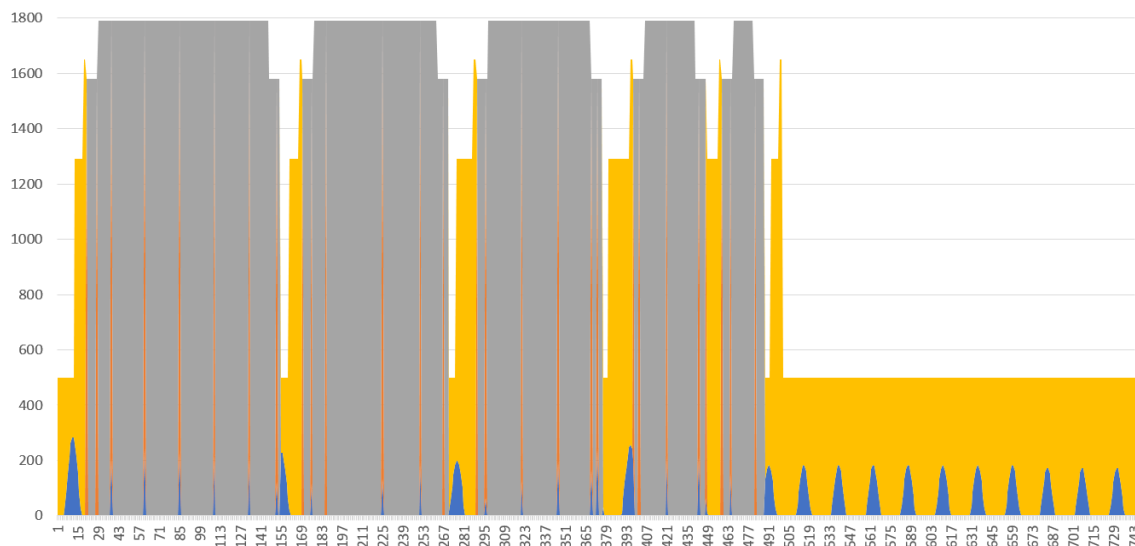


Figura 3.76 Potenza erogata alla nave nel mese di ottobre [kW - ore]

3.3.9.4.5 CONCLUSIONI DELLA SIMULAZIONE 4

In questa simulazione si voleva comprendere il contributo della batteria per l'erogazione dell'energia. È stato analizzato un *range* di valori compreso fra 0 kWh e 5.000 kWh con un intervallo di 500 kWh.

Si è riuscito ad osservare che sotto un determinato valore di capacità è come se la batteria fosse assente, siccome possiede una quantità di energia troppo piccola per poter soddisfare le richieste della nave per un'ora, anche con il contributo dei pannelli fotovoltaici. La sua assenza, nel caso di 0 kWh, o la sua incapacità di contribuire alle richieste della nave fa sì che i parametri associati al motore diesel peggiorino visto che, quando presente, la potenza prodotta dai pannelli fotovoltaici non venendo assorbita dalla batteria, ma andando a soddisfare la richiesta della nave fa abbassare il carico del motore. Ne consegue che la sua presenza è fondamentale per riuscire a far operare il motore diesel il più possibile vicino al punto di design.

La capacità della batteria, una volta raggiunto il valore minimo tale per cui riesca ad assorbire tutta l'energia elettrica prodotta dai pannelli fotovoltaici, un aumento di tale valore non trova apparentemente ragioni. La spesa dovuta all'aumento del dimensionamento della batteria non è giustificata con un'analisi fatta soltanto durante il periodo di navigazione, però un suo sovradimensionamento potrebbe essere giustificato per altre ragioni, per esempio quella di usare la batteria per accumulare l'eccesso prodotto dai pannelli fotovoltaici nel periodo di stazionamento in porto per soddisfare le richieste della nave durante le ore notturne.

3.3.9.5 SIMULAZIONE 5

Nella seguente simulazione si andrà ad analizzare i risultati che si ottengono modificando i parametri peculiari dei pannelli fotovoltaici e quello associato alla batteria, l'obiettivo è di riuscire a definire la capacità della batteria del motore ibrido più adatta per ogni singolo caso.

Come evidenziato nelle conclusioni della simulazione 4 per la definizione della capacità si considereranno il suo dimensionamento minimo fra l'insieme delle capacità alle quali si ha il rendimento del motore diesel più alto possibile, così da ottenere un consumo specifico più basso possibile. Nella seguente simulazione si sono previste pure delle batterie alle banchine dei porti di Aden e di Dalian per delle capacità rispettivamente di 9.842 e 8.359 kWh. Le batterie in banchina risultano utili per minimizzare i costi relativi all'energia elettrica prelevata dalla rete, ovviamente la loro presenza può essere motivata solo per produzioni elevate di energia elettrica dai pannelli fotovoltaici, in particolare quando l'energia elettrica prodotta in eccesso dai pannelli in tutta la giornata riesca a soddisfare una buona quota della richiesta totale notturna della nave.

Questa simulazione a causa delle sue molteplici combinazioni verrà analizzata solamente per un rendimento pari a 17 % o 20% e per capacità pari a 3.000 kWh o per valori maggiori.

Siccome l'obiettivo è trovare un legame fra la capacità della batteria con i pannelli fotovoltaici si tratteranno i risultati fissando il rendimento e tabellando i valori di rendimento, consumi specifici e litri di combustibile in funzione della capacità e della superficie. Inoltre è presente una quarta tabella, nella quale si riportano i kWh che si risparmierebbero di acquistare dalla rete elettrica se ci fosse una batteria per accumulare gli eccessi prodotti dai pannelli durante il giorno.

Nel codice per simulare la presenza della batteria del porto si è dovuto cambiare la logica del codice nei periodi di fermo in porto. Il codice dà, come è usale, una priorità all'energia elettrica prodotta dai pannelli fotovoltaici che contribuiranno alla domanda energetica della nave cedendo tutto ciò che è possibile erogare o se la loro produzione è superiore fino alla domanda della nave. In questo caso l'eccesso prodotto dai pannelli non verrà più immesso nella rete elettrica, ma verrà accumulato dalla batteria. Nel caso in cui la batteria del porto sia completamente carica allora verrà indirizzato alla rete.

Quando l'erogazione dei pannelli non è sufficiente per il soddisfacimento della richiesta della nave, in questa simulazione, si è data la priorità alla batteria del porto, che si è ricaricata dagli eccessi prodotti dai pannelli. Questo permette di non dover acquistare la stessa quantità di energia elettrica prodotta durante il giorno, ma con un prezzo maggiorato a causa degli oneri. La rete elettrica interverrà solo nel caso in cui ci sia una produzione di energia elettrica dai pannelli minore della richiesta della nave e questa differenza non la possa fornire la batteria del porto.

3.3.9.5.1 GENNAIO

RENDIMENTO PANNELLI FOTOVOLTAICI: 17%

Nel mese di gennaio si sono ottenuti i risultati della tabella 3.15.

Il rendimento del motore a parità di capacità diminuisce all'aumentare della superficie, però si nota che non ha un legame con la capacità della batteria, mentre il parametro che influenza è la potenza limite di carica della batteria. Le capacità analizzate sono sufficientemente capienti da immagazzinare la produzione dei pannelli, però a causa del valore di potenza limite di carica imposto non tutta la produzione dei pannelli viene destinata alla batteria per ricaricarsi. Perciò per poter andare ad aumentare il rendimento del motore diesel si dovrebbe designare alla nave una batteria con un limite di carica adatto alle dimensioni dei pannelli. Infatti si osserva che i valori del rendimento, a parità di superficie, restano in valori prossimi fra loro.

I consumi specifici, essendo inversamente proporzionali ai rendimenti ottenuti seguiranno una logica fedele a quella seguita fino ad ora.

I litri di combustibile diminuiscono all'aumentare sia della superficie che della capacità, ma quest'ultima fa sì che diminuisca solo per il fatto che quando la nave salpa da tutti i porti ha una SOC del 100% e perciò con una maggiore quantità di energia da poter fornire, ma a seguito della prima scarica il contributo di una batteria di capacità di 3.000 kWh ed una di 5.000 kWh è lo stesso.

Nell'ultima tabella sono presenti i kWh che la batteria che è stata prevista nelle banchine dei porti di Dalian e di Aden. La ricarica delle batterie in banchina dev'essere solamente dai pannelli fotovoltaici, siccome lo scopo di essa è proprio di ridurre i kWh acquistati dalla rete.

Ad ogni valore di rendimento e superficie in un determinato mese si otterranno un numero di kWh che bisognerà fornire siccome in quelle ore l'energia prodotta dai pannelli non è sufficiente. I valori diminuiscono all'aumentare della superficie e sono i seguenti:

- 3.000 m²: 101.737,77 kWh;
- 4.000 m²: 93.151,56 kWh;
- 5.000 m²: 89.013,30 kWh;
- 6.000 m²: 86.207,96 kWh;
- 7.000 m²: 83.972,80 kWh;
- 8.000 m²: 82.677,48 kWh;
- 9.000 m²: 81.382,16 kWh;
- 10.000 m²: 80.127,95 kWh.

		Capacità [kWh]					
	[%]	3.000	3.500	4.000	4.500	5.000	
Superficie [m ²]	3.000	42,7539	42,7539	42,7539	42,7539	42,7539	
	4.000	42,7539	42,7539	42,7539	42,7539	42,7539	
	5.000	42,7539	42,7539	42,7539	42,7539	42,7539	
	6.000	42,7538	42,7538	42,7538	42,7538	42,7538	
	7.000	42,7523	42,7520	42,7521	42,7521	42,7521	
	8.000	42,7466	42,7470	42,7469	42,7465	42,7476	
	9.000	42,7382	42,7383	42,7389	42,7380	42,7394	
	10.000	42,7254	42,7275	42,7261	42,7269	42,7274	
		[g/kWh]	3.000	3.500	4.000	4.500	5.000
		3.000	197,19603	197,19603	197,19603	197,19603	197,19604
		4.000	197,19604	197,19605	197,19604	197,19604	197,19604
		5.000	197,19606	197,19606	197,19606	197,19606	197,19608
		6.000	197,19678	197,19661	197,19658	197,19647	197,19649
		7.000	197,20351	197,20487	197,20448	197,20465	197,20444
		8.000	197,22983	197,22823	197,22835	197,23019	197,22534
		9.000	197,26892	197,26845	197,26566	197,26987	197,26341
		10.000	197,32919	197,31892	197,32607	197,32204	197,31985
		[litri]	3.000	3.500	4.000	4.500	5.000
		3.000	146.819	146.771	146.365	146.054	145.290
		4.000	143.665	143.570	143.570	142.853	142.853
		5.000	141.491	140.463	140.463	140.463	139.603
		6.000	138.385	138.385	138.027	137.214	136.808
		7.000	136.312	135.859	134.831	134.472	134.472
		8.000	133.176	133.222	132.864	132.770	132.408
		9.000	131.577	131.171	130.451	130.502	129.996
		10.000	129.227	128.862	128.914	128.457	127.595
		[kWh]	3.000	3.500	4.000	4.500	5.000
		3.000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		4.000	2.514,54	2.514,54	2.514,54	2.514,54	2.514,54
		5.000	9.477,02	9.477,02	9.477,02	9.477,02	9.477,02
	6.000	17.772,43	17.772,43	17.772,43	17.772,43	17.772,43	
	7.000	26.638,01	26.638,01	26.638,01	26.638,01	26.638,01	
	8.000	36.443,44	36.443,44	36.443,44	36.443,44	36.443,44	
	9.000	46.248,87	46.248,87	46.248,87	46.248,87	46.248,87	
	10.000	56.095,40	56.095,40	56.095,40	56.095,40	56.095,40	

Tabella 3.16 Valori del rendimento del motore, del suo consumo specifico, dei litri di combustibile e dei kWh erogati dalla batteria del porto nel mese di gennaio

Da questi valori appena elencati si può quantificare il contributo della batteria presente nella banchina e perciò determinare quanto sia rilevante la sua presenza.

Nel caso si una superficie di 3.000 m² non si ottengono delle produzioni in eccesso, mentre per 4.000 m² si hanno delle produzioni in eccesso, anche se il loro contributo è molto basso. In questo caso si osserva che la batteria in banchina non serve, ma che sarebbe sufficiente utilizzare la batteria della nave. Il suo contributo è basso, contribuendo completamente al soddisfacimento delle richieste della nave per un'ora e parzialmente per un'altra ora.

Nei casi fra 5.000 e 7.000 m² i loro contributi sono bassi in percentuale, soddisfacendo rispettivamente del 10,65%, 20,62% e 31,72%.

Per i valori di superficie maggiore a 7.000 m² il contributo della batteria durante il periodo notturno aumenta, arrivando fino al 70%.

Successivamente verranno riportati dei grafici con una metratura dei pannelli di 8.000 m² e una capacità di 3.500 kWh.

Confrontando i valori presenti nella tabella 3.16 con quelli che si erano ottenuti nella simulazione 3 si vede che i risultati sono peggiori e questo dev'essere dovuto all'unico cambiamento che impatta sul funzionamento del motore, la capacità della batteria.

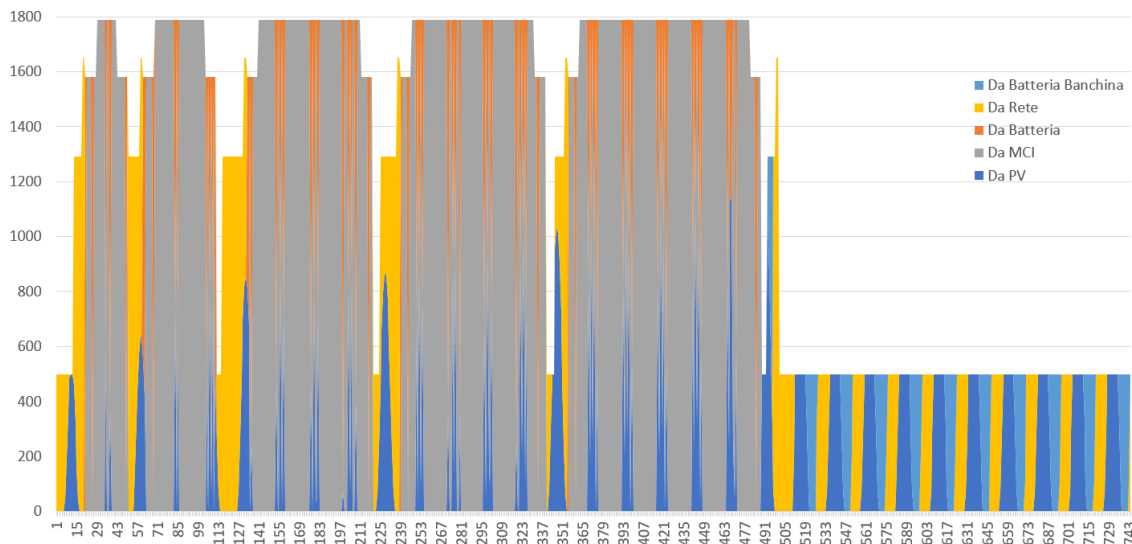


Figura 3.77 Potenza erogata alla nave nel mese di gennaio [kW – ore]

Nella figura 3.77 si nota che nelle ore successive alla quattrocento novantunesima si ha il contributo della batteria della banchina. Il suo contributo ha un doppio effetto positivo, il primo è economico, riducendo i costi energetici e il secondo è ridurre emissioni sia da provenienza della nave sia quelle con provenienza delle centrali elettriche che forniscono l'energia elettrica in quell'area. Il ridursi del contributo della rete elettrica lo si vede nella figura 3.78, nel quale l'area della voce "Alla Nave" si è notevolmente ridotta ed inoltre non è più presente la voce "Da PV", significa che tutta l'energia in eccesso prodotta durante il giorno riesce a venire impiegata durante il periodo notturno, compensando il deficit di energia con l'acquisto dalla rete elettrica.

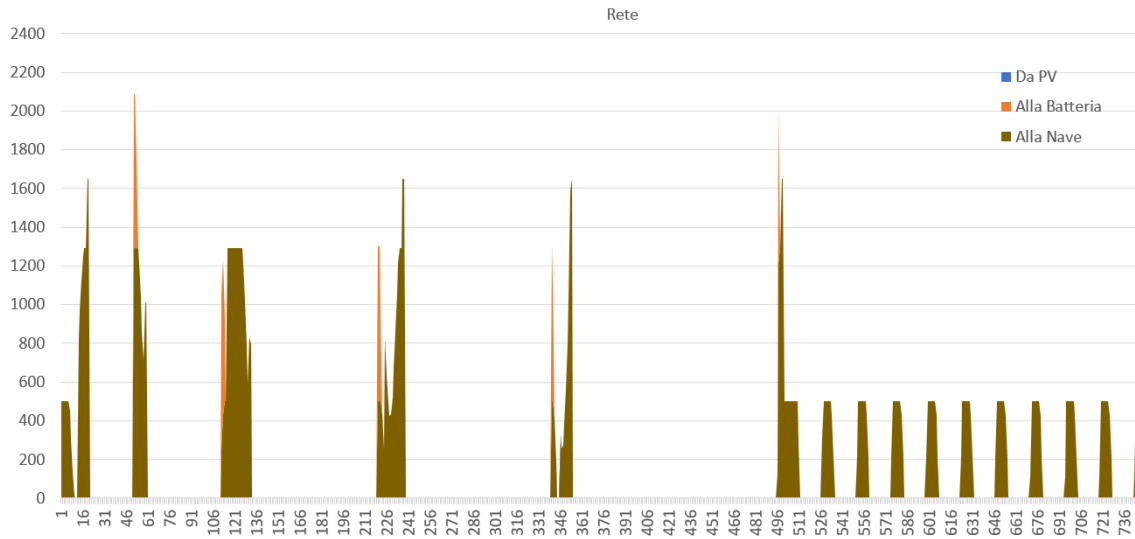


Figura 3.78 Potenza della rete nel mese di ottobre [kW – ore]

Confrontando l'immagine 3.79 con la 3.48 si vede che l'energia in eccesso cambia destinatario, in particolare si indirizza l'elettricità prodotta alla batteria in banchina, evitando che venga immessa in rete per poi doverla ricomprare quando il contributo fotovoltaico viene a mancare. Questa dinamica fa sì che non si vadano a pagare gli oneri presenti nell'elettricità acquistata dalla rete.

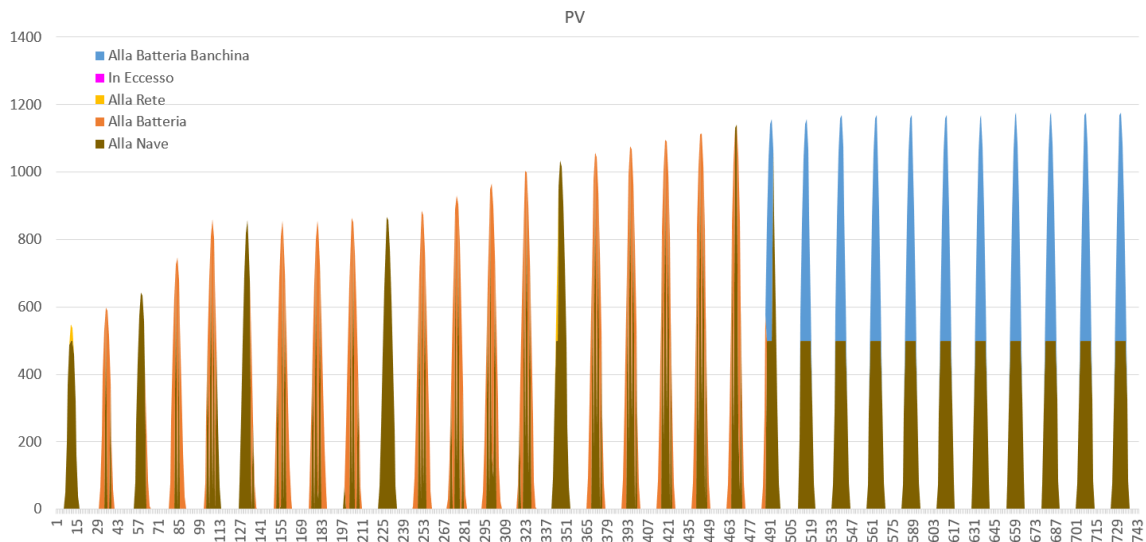


Figura 3.79 Potenza erogata dai pannelli fotovoltaici nel mese di gennaio [kW – ore]

RENDIMENTO PANNELLI FOTOVOLTAICI: 20%

Successivamente si riporteranno delle tabelle analoghe al caso precedentemente trattato, l'unica differenza è il rendimento dei pannelli fotovoltaici che assumerà il valore di 20%.

Nella tabella 3.17, che è analoga alla tabella 3.16, sono riportati i valori di rendimento del motore diesel, del consumo specifico medio, dei litri di combustibile consumati nel mese e i kWh che la batteria potrebbe accumulare.

Nell'analisi del rendimento si nota che lo stesso diminuisce, per effetto dell'eccesso di potenza prodotta dai pannelli fotovoltaici, a causa del limite di carica della batteria non aggiornato, una parte della produzione dai pannelli verrà usato per il carico della nave, ma questo fa sì che il carico della nave si abbassi così da ridurre anche il rendimento del motore. Per ovviare a ciò bisogna prevedere che ad un aumento della capacità della batteria ne segua anche un aumento della potenza limite di carica della batteria.

I consumi specifici tendono ad aumentare all'aumentare della capacità e all'aumentare della superficie dei pannelli fotovoltaici, di conseguenza il rendimento avrà l'andamento opposto.

Il contributo della batteria presente nella banchina aumenta all'aumentare della superficie dei pannelli e resta costante al variare della capacità della batteria, questo siccome nella logica del codice si è fatto sì che la batteria non interagisca nei periodi di ormeggio.

Il contributo della batteria della banchina, come appena detto, dipende solamente dei parametri relativi ai pannelli fotovoltaici della nave:

- 3.000 m²: 96.163,40 kWh;
- 4.000 m²: 89.83840 kWh;
- 5.000 m²: 86.538 kWh;
- 6.000 m²: 83.896,60 kWh;
- 7.000 m²: 82.372,70 kWh;
- 8.000 m²: 80.848,80 kWh;
- 9.000 m²: 79.444,30 kWh;
- 10.000 m²: 78.077 kWh.

Come si vede rispetto il caso in cui il rendimento era 17% i valori sono leggermente minori per un rendimento maggiore dei pannelli. Anche in questo caso la batteria nella banchina risulterebbe utile solo per superfici dei pannelli fotovoltaici maggiori di 7.000 m².

		Capacità [kWh]					
[%]		3.000	3.500	4.000	4.500	5.000	
Superficie [m ²]	3.000	42,7539	42,7539	42,7539	42,7539	42,7539	
	4.000	42,7539	42,7539	42,7539	42,7539	42,7539	
	5.000	42,7538	42,7538	42,7538	42,7539	42,7539	
	6.000	42,7519	42,7518	42,7519	42,7519	42,7520	
	7.000	42,7449	42,7459	42,7450	42,7456	42,7454	
	8.000	42,7349	42,7349	42,7331	42,7350	42,7319	
	9.000	42,7183	42,7177	42,7160	42,7182	42,7153	
	10.000	42,7109	42,7090	42,7086	42,7038	42,7047	
	[g/kWh]	3.000	3.500	4.000	4.500	5.000	
	3.000	197,19603	197,19604	197,19604	197,19604	197,19604	
	4.000	197,19606	197,19606	197,19606	197,19606	197,19606	
	5.000	197,19633	197,19644	197,19632	197,19624	197,19626	
	6.000	197,20561	197,20596	197,20551	197,20558	197,20482	
	7.000	197,23766	197,23309	197,23721	197,23445	197,23558	
	8.000	197,28441	197,28432	197,29277	197,28401	197,29837	
	9.000	197,36311	197,36577	197,37341	197,36313	197,37692	
	10.000	197,39769	197,40662	197,40878	197,43217	197,42761	
	[litri]	3.000	3.500	4.000	4.500	5.000	
	3.000	145.959	144.836	144.430	144.071	144.071	
	4.000	141.993	141.993	141.180	140.870	140.822	
	5.000	138.791	138.385	138.027	137.620	137.214	
	6.000	135.955	135.501	134.831	134.425	134.472	
	7.000	132.822	132.772	132.368	132.414	131.650	
	8.000	130.369	130.057	130.063	129.603	128.895	
	9.000	127.671	127.721	126.960	126.499	126.509	
	10.000	125.302	124.854	124.089	123.745	123.742	
	[kWh]	3.000	3.500	4.000	4.500	5.000	
	3.000	302,50	302,50	302,50	302,50	302,50	
	4.000	7.037,20	7.037,20	7.037,20	7.037,20	7.037,20	
	5.000	16.796,50	16.796,50	16.796,50	16.796,50	16.796,50	
6.000	27.214,80	27.214,80	27.214,80	27.214,80	27.214,80		
7.000	38.750,60	38.750,60	38.750,60	38.750,60	38.750,60		
8.000	50.286,40	50.286,40	50.286,40	50.286,40	50.286,40		
9.000	61.941,60	61.941,60	61.941,60	61.941,60	61.941,60		
10.000	73.063,40	73.063,40	73.063,40	73.063,40	73.063,40		

Tabella 3.17 Valori del rendimento del motore, del suo consumo specifico, dei litri di combustibile e dei kWh erogati dalla batteria del porto nel mese di gennaio

3.3.9.5.2 APRILE

RENDIMENTO PANNELLI FOTOVOLTAICI: 17%

Nel mese di aprile si sono analizzati i risultati al variare della superficie dei pannelli e della capacità della batteria. Dalle considerazioni ottenute nella sezione “gennaio – rendimento pannelli fotovoltaici 17%” si è deciso di far variare in maniera proporzionale, rispetto ai valori del caso standard, la potenza limite di carica in funzione della capacità della batteria. Inoltre a causa della poca variabilità dei risultati al variare della capacità si è deciso di svolgere successivamente solo i casi di 3.000 kWh, 4.000 kWh e 5.000 kWh di capacità, riducendo il campionamento dei risultati.

		Capacità [kWh]		
	[%]	3.000	4.000	5.000
Superficie [m ²]	4.000	42,7539	42,7539	42,7539
	6.000	42,7538	42,7539	42,7539
	8.000	42,7484	42,7539	42,7539
	10.000	42,7366	42,7511	42,7539
	[g/kWh]	3.000	4.000	5.000
	4.000	197,19606	197,19606	197,19608
	6.000	197,19640	197,19611	197,19611
	8.000	197,22162	197,19624	197,19614
	10.000	197,27655	197,20926	197,19618
	[litri]	3.000	4.000	5.000
	4.000	141.682	140.606	139.889
	6.000	134.968	133.845	133.486
	8.000	128.676	127.036	126.008
	10.000	121.900	120.831	119.557
	[kWh]	3.000	4.000	5.000
	4.000	325,12	325,12	325,12
	6.000	11.895,88	11.895,88	11.895,88
8.000	27.745,80	27.745,80	27.745,80	
10.000	44.267,15	44.267,15	44.267,15	

Tabella 3.18 Valori del rendimento del motore, del suo consumo specifico, dei litri di combustibile e dei kWh erogati dalla batteria del porto nel mese di aprile

Dalla tabella 3.18 si nota che i rendimenti non hanno cambiato i loro andamenti, in particolare il rendimento diminuisce all’aumentare della superficie, però dato che si ha un aumento della potenza limite di carica della batteria, la limitazione in questo caso sarà che, a capacità definita e quindi a potenze limite di carica e scarica definite, la capacità della batteria per una determinata superficie non è più sufficiente. Come si vede nel caso di 3.000 kWh il rendimento per valori maggiori di 4.000 m² inizia a calare, mentre per 4.000 kWh di capacità il rendimento

inizia a diminuire per valori maggiori di 8.000 m². Nell'insieme di casi a capacità di 5.000 kWh il rendimento non cala per l'intervallo di valori della superficie selezionato, anche se si guardano i valori di consumo specifico si notano delle variazioni e questo implica che anche il rendimento varia, anche se non percepibile per l'approssimazione fatta di quattro cifre decimali.

Il contributo dell'aumento della capacità nel consumo del combustibile ci permette di risparmiare più combustibile rispetto al caso in cui non si aggiornava la potenza limite di carica.

La batteria presente sulla banchina del porto di Dalian fa sì che si risparmino i kWh riportati nell'ultima sezione della tabella 3.18, l'unico caso in cui il *surplus* prodotto dai pannelli della nave risulta poco incisivo è quello di 4.000 m², mentre negli altri casi si ottengono una riduzione dell'energia elettrica che servirebbe prendere dalla rete elettrica quando la produzione dei pannelli è minore di quella richiesta dalla nave del 15,90%, 39,28% e 65,95%.

Successivamente si riportano i grafici ottenuti nel caso di 8.000 m² e con una capacità di 4.000 kWh.

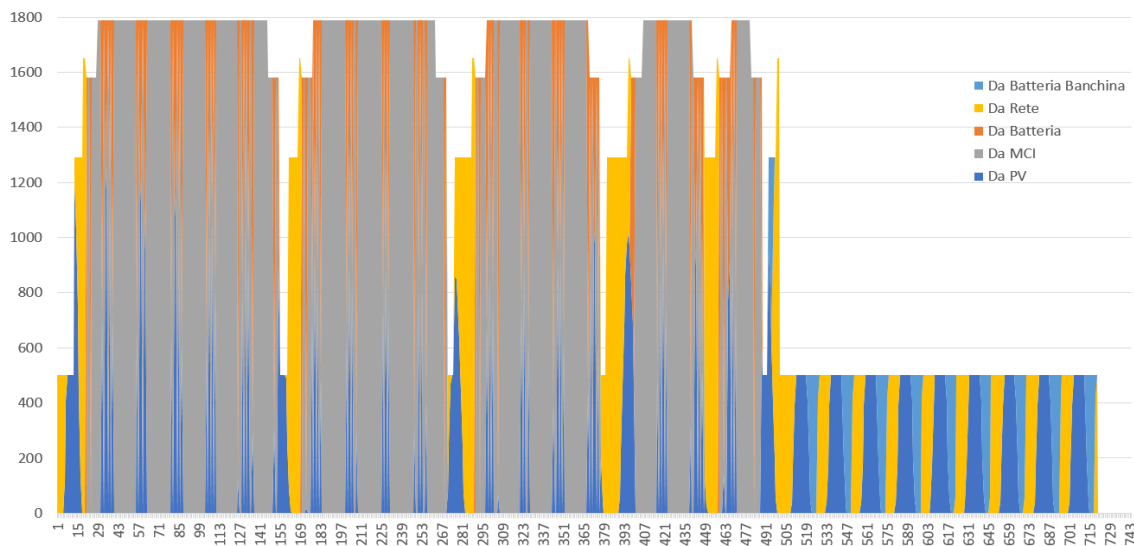


Figura 3.80 Potenza erogata alla nave nel mese di aprile [kW - ore]

Nella figura 3.80 si ottengono due risultati, il primo è riguardante la navigazione, mentre il secondo è relativo al periodo di *Port-Stay*. Il primo fatto da osservare è che aumentando il limite di potenza di carica della batteria il numero di scariche della batteria aumenta grazie ad una ricarica più rapida, la seconda osservazione la si ottiene analizzando le ore di fermo nel porto di Dalian, ovvero quelle successive alla quattrocento novantunesima. In questo periodo di tempo l'erogazione di energia è alternata da contributi dell'energia solare a quelli della rete elettrica. Il contributo dell'energia solare avviene prima in maniera diretta, ovvero dai pannelli solari, ed in seguito in maniera indiretta, ovvero dalla batteria che ha accumulato la produzione in eccesso dei pannelli.

Nella figura 3.81 è presente la fase di carica e scarica della batteria, ciò che si nota è che raggiunge dei picchi maggiori fra i valori negativi, che per convenzione sono stati assunti come quelli relativi alle fasi di carica.

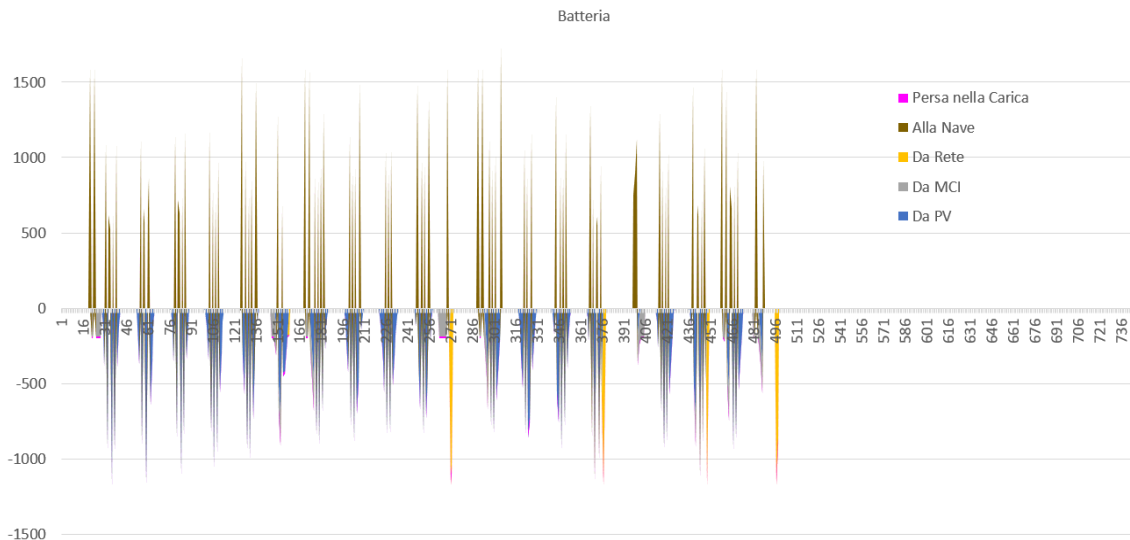


Figura 3.81 Potenza scambiata dalla batteria nel mese di aprile [kW – ore]

RENDIMENTO PANNELLI FOTOVOLTAICI: 20%

La seguente sezione viene riportata con un rendimento di 20% dei pannelli fotovoltaici, mentre gli altri due parametri verranno fatti variare come è successo nella sezione precedente con il rendimento dei pannelli del 17%.

Nella tabella 3.19 si osserva la stessa relazione fra la scelta della capacità della batteria e la superficie del pannello fissato per ottenere il rendimento massimo nel motore diesel. Per una superficie di 4.000 m² si ha che la capacità più adatta, fra i valori analizzati, è di 3.000 kWh. Questo siccome aumentando la capacità di una batteria non si hanno dei miglioramenti in termini di rendimento e consumo specifico, ma l'unico effetto è che aumentino solo i costi della batteria ed il suo ingombro all'interno della nave. Tutta la capacità aggiunta a quella minima tale per cui la batteria è capace di assorbire l'energia prodotta dai pannelli in un'ora viene usata solo nella prima ora di scarica all'uscita da ogni porto, questo è il suo unico contributo durante la navigazione ed è ciò che fa sì che i litri di combustibile diminuiscano di quel poco riportato in tabella.

Per superfici di 10.000 m² si vede che non si ottengono rendimenti massimi, questo siccome il *range* delle capacità riportate ha valori troppo bassi, probabilmente con 5.500 kWh si otterrebbe il rendimento di 42,7539% desiderato.

La batteria presente nella banchina del porto di Aden dà un contributo che varia in funzione della superficie dei pannelli. Questi ultimi contribuiscono in due maniere, la prima è che la potenza richiesta alla batteria da fornire diminuisce, siccome avendo una superficie maggiore implica che in alcune ore nelle quali c'erano irraggiamenti non sufficienti per raggiungere i 500 kW richiesti dalla nave, però aumentando la superficie si fa sì che in alcune ore in cui un determinato irraggiamento non era sufficiente per la produzione di 500 kW, ora lo si ha. Il secondo contributo è che una superficie maggiore implica una maggiore quantità di energia disponibile da fornire alla batteria.

Come si può riscontrare in tabella 3.18 i contributi della batteria portuale in funzione della superficie è:

- 4.000 m²: 3.428,80 kW su 79.324,80 kW;
- 6.000 m²: 20.011,00 kW su 72.334,99 kW;
- 8.000 m²: 39.348,00 kW su 68.100,00 kW;
- 10.000 m²: 56.338,71 kW su 65.545,00 kW.

Il contributo della batteria aumenta con la superficie ed escluso il caso di 4.000 m² la presenza della batteria sarebbe molto utile siccome per gli altri tre valori di superficie si hanno dei contributi del 27,66%, del 57,78% e del 85,95%.

		Capacità [kWh]		
[%]		3.000	4.000	5.000
Superficie [m ²]	4.000	42,7539	42,7539	42,7539
	6.000	42,7525	42,7539	42,7539
	8.000	42,7381	42,7533	42,7539
	10.000	42,7191	42,7480	42,7538
	[g/kWh]	3.000	4.000	5.000
	4.000	197,19608	197,19608	197,19608
	6.000	197,20267	197,19611	197,19611
	8.000	197,26987	197,19894	197,19617
	10.000	197,35881	197,22377	197,19666
	[litri]	3.000	4.000	5.000
	4.000	139.699	138.265	137.859
	6.000	131.006	130.596	129.520
	8.000	123.927	122.306	121.588
	10.000	117.169	114.747	113.297
[kWh]	3.000	4.000	5.000	
4.000	3.428,80	3.428,80	3.428,80	
6.000	20.011,00	72.335,00	72.335,00	
8.000	39.348,00	39.348,00	39.348,00	
10.000	56.338,71	56.338,71	56.338,71	

Tabella 3. 19 Valori del rendimento del motore, del suo consumo specifico, dei litri di combustibile e dei kWh erogati dalla batteria del porto nel mese di aprile

3.3.9.5.3 LUGLIO

RENDIMENTO PANNELLI FOTOVOLTAICI: 17%

Nel seguente mese non sono state fatte modifiche rispetto il mese di aprile, ed i dati esaminati restano anch'essi gli stessi.

Nella tabella 3.20 si ottengono dei dimensionamenti della batteria della nave minori rispetto al caso precedente, però questo è dovuto al fatto che si sta analizzando un mese differente. Quello che si può evidenziare è la considerazione fatta sul caso di 10.000 m², che nel caso precedente sarebbe servito una capacità maggiore del *range* esaminato, invece in questo caso no. Ottenere il valore di rendimento riportato nella casella di 10.000 m² e 5.000 kWh implica un risultato di conferma alla considerazione fatta nel mese precedente.

Nella tabella 3.20 non si riscontrano anomalie alle considerazioni fatte nel mese di aprile.

		Capacità [kWh]			
		[%]	3.000	4.000	5.000
Superficie [m ²]	4.000	42,7539	42,7539	42,7539	
	6.000	42,7539	42,7539	42,7539	
	8.000	42,7528	42,7539	42,7539	
	10.000	42,7423	42,7536	42,7539	
		[g/kWh]	3.000	4.000	5.000
	4.000	197,19604	197,19604	197,19606	
	6.000	197,19608	197,19609	197,19609	
	8.000	197,20126	197,19611	197,19611	
	10.000	197,25003	197,19746	197,19615	
		[litri]	3.000	4.000	5.000
	4.000	143.211	142.853	142.040	
	6.000	137.620	136.091	135.685	
	8.000	131.579	130.906	130.047	
	10.000	126.426	124.863	123.643	
		[kWh]	3.000	4.000	5.000
	4.000	0	0	0	
	6.000	8.527,04	8.527,04	8.527,04	
8.000	22.777,52	22.777,52	22.777,52		
10.000	38.744,05	38.744,05	38.744,05		

Tabella 3.20 Valori del rendimento del motore, del suo consumo specifico, dei litri di combustibile e dei kWh erogati dalla batteria del porto nel mese di luglio

Ogni 2.000 m² in più di superficie porta ad una riduzione di 6.000 litri di combustibile, però ad un aumento di superficie dei pannelli segue anche un aumento della capacità che anch'essa contribuisce ad una riduzione di 1.000 litri di combustibile per ogni 1.000 kWh in più.

Con i risultati ottenuti e quindi con una stima dei litri di combustibile risparmiati si potrebbe calcolare in quanto tempo si rientrerebbe della spesa fatta per aumentare la superficie e la capacità, così da determinare la fattibilità del progetto.

In questo mese il contributo che avrebbe la batteria nella banchina diminuirebbe a causa di un irraggiamento più basso, come è stato già sottolineato in figura 3.29. Infatti il suo contributo raggiunge al massimo il ricoprimento del 49,43% della richiesta fattagli dalla nave.

Dalla figura 3.82 si riscontra che l'area del grafico, che rappresenta l'energia presa da quella sorgente, è maggiore siccome bisogna compensare la riduzione di irraggiamento nella località di Aden.

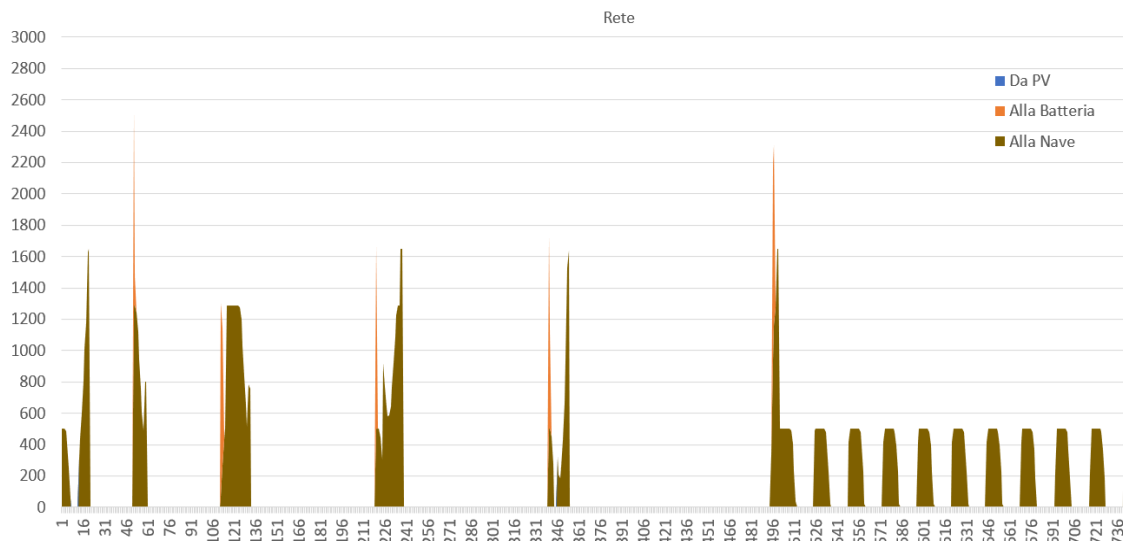


Figura 3.82 Potenza della rete nel mese di luglio [kW - ore]

Dal grafico della potenza fornita alla petroliera si può osservare che l'abbassamento dell'irraggiamento non permette alla batteria di intervenire con una frequenza come nel caso precedente e così anche la batteria in banchina non riesce a ricoprire la richiesta della nave per un numero di ore elevato.

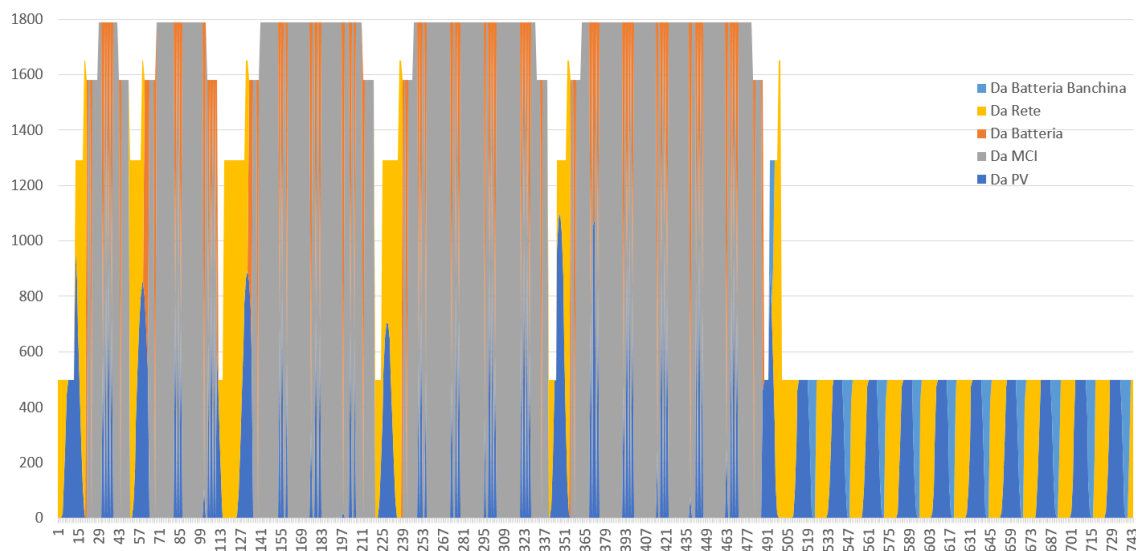


Figura 3.83 Potenza erogata alla nave nel mese di luglio [kW - ore]

RENDIMENTO PANNELLI FOTOVOLTAICI: 20%

Nel mese di luglio con un rendimento dei pannelli fotovoltaici del 20% la capacità della batteria e la superficie dei pannelli assumeranno gli stessi valori assunti nelle ultime simulazioni.

I grafici che verranno riportati in questo mese sono quelli con i valori di 10.000 m² e 5.000 kWh. Non verranno riportati tutti i grafici della simulazione siccome alcuni non risultano rilevanti al fine di commentare i risultati ottenuti, però tutti i grafici sono presenti nell'appendice A.

Nella figura 3.84 viene riportata la potenza fornita alla nave nelle condizioni considerate, che rappresentano quelle che permettono la riduzione maggiore del consumo del combustibile, infatti in queste condizioni si ha una riduzione di 6.853 litri rispetto al caso standard. Il contributo di questa simulazione non si misura attraverso un'analisi dei litri di combustibile, siccome per ottenerla il contributo è quello delle caratteristiche dei pannelli.

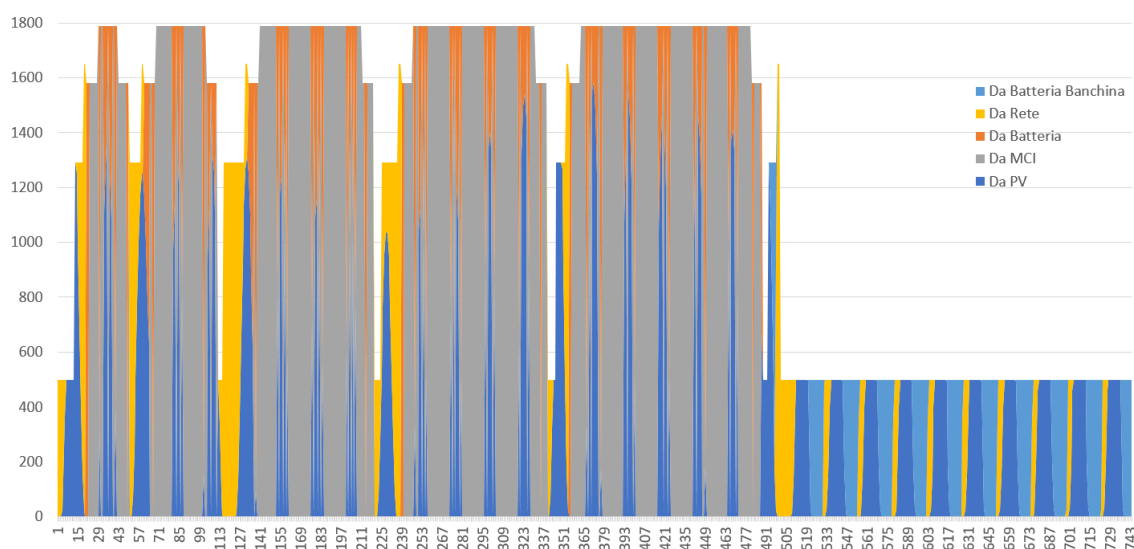


Figura 3.84 Potenza erogata alla nave nel mese di luglio [kW - ore]

L'obiettivo della simulazione è riuscire a ridurre l'energia elettrica prelevata dalla rete visto che anch'essa ha un impatto ambientale siccome viene prodotta per la maggior parte da combustibili fossili.

Nella tabella 3.21 si riportano i valori di rendimento medio mensile, di consumo specifico medio mensile, litri consumati nel mese e i kWh erogati dalla batteria nella banchina. Sorvolando i parametri del motore diesel e soffermandosi sulla quantità di energia elettrica che la batteria ci permetterebbe di ridurre, si vede che si avrebbero le seguenti riduzioni:

- 4.000 m²: 1.498,80 kWh su 91.641,20 kWh;
- 6.000 m²: 15.739,00 kWh su 83.432,60 kWh;
- 8.000 m²: 33.994,40 kWh su 79.239,20 kWh;
- 10.000 m²: 53.092,00 kWh su 75.888,00 kWh.

Si avrebbero delle riduzioni dei costi connessi alla energia elettrica prelevata rispettivamente del 1,63%, 18,86%, 42,90% e 69,96%. Con le prime due metrature, ed in particolare nel primo caso, non si ottengono dei contributi rilevanti per ridurre i costi dell'energia elettrica.

		Capacità [kWh]		
	[%]	3.000	4.000	5.000
Superficie [m ²]	4.000	42,7539	42,7539	42,7539
	6.000	42,7539	42,7539	42,7539
	8.000	42,7474	42,7539	42,7539
	10.000	42,7268	42,7526	42,7539
	[g/kWh]	3.000	4.000	5.000
	4.000	197,19606	197,19610	197,19610
	6.000	197,19626	197,19610	197,19610
	8.000	197,22610	197,19620	197,19610
	10.000	197,32280	197,20240	197,19610
	[litri]	3.000	4.000	5.000
	4.000	141.276	140.822	139.293
	6.000	134.371	133.607	132.890
	8.000	127.677	126.797	125.674
	10.000	122.050	119.992	118.865
	[kWh]	3.000	4.000	5.000
	4.000	1.498,80	1.498,80	1.498,80
	6.000	15.739,00	15.739,00	15.739,00
8.000	33.994,40	33.994,40	33.994,40	
10.000	53.092,00	53.092,00	53.092,00	

Tabella 3.21 Valori del rendimento del motore, del suo consumo specifico, dei litri di combustibile e dei kWh erogati dalla batteria del porto nel mese di luglio

3.3.9.5.4 OTTOBRE

RENDIMENTO PANNELLI FOTOVOLTACI: 17%

Nel mese di ottobre, come nei mesi precedentemente descritti, si ricerca l'impatto che avrebbe una batteria nella banchina del porto di arrivo a livello di kWh acquistati dalla rete elettrica e si analizza la relazione fra la capacità che dovrebbe avere la batteria in funzione della superficie dei pannelli fotovoltaici e del loro rendimento. Quest'ultima analisi viene fatta per ottenere i valori migliori connessi al motore diesel, in particolare si vorrà che il rendimento del motore sia il più alto possibile, mentre il consumo specifico e il combustibile usato si vogliono minimizzare.

Nella tabella 3.22 sono stati evidenziati i valori fra quelli possibili che sarebbero migliori, fissati i parametri dei pannelli fotovoltaici, si deve dimensionare la batteria con la capacità minima tale per cui il motore ci dia il rendimento di design.

Per superfici di 8.000 e 10.000 m² per conoscere con precisione il valore bisognerebbe, per il primo caso analizzare delle grandezze intermedie di capacità fra 3.000 e 4.00 kWh, mentre per il secondo caso si dovrebbe vedere i valori di rendimento che si otterrebbero nel *range* fra 4.000 e 5.000 kWh. Questo risulta necessario per diminuire il costo della batteria al minimo e il suo ingombro all'interno della nave che è un problema rilevante nella fase della sua progettazione. Per le superfici di 4.000 e 6.000 m² sono stati evidenziati i valori relativi a 3.000 kWh di capacità, anche se non si è certi siccome non si hanno i risultati per capacità inferiori siccome fuori dall'intervallo d'analisi. Di certo si esaminerà almeno il *range* da 2.000 a 3.000 kWh.

Il contributo della batteria presente nel porto non dà grossi contributi neanche per superfici elevate visto che fornisce al massimo il 20% di ciò che gli si richiede di erogare. Per i mesi invernali, nei quali l'irraggiamento è più basso si dovrebbe prevedere una fonte di energia rinnovabile differente per far sì che compensi ciò che i pannelli della nave non riescono a fornire.

		Capacità [kWh]		
		3.000	4.000	5.000
Superficie [m ²]	[%]			
	4.000	42,7539	42,7539	42,7539
	6.000	42,7539	42,7539	42,7539
	8.000	42,7522	42,7539	42,7539
	10.000	42,7406	42,7532	42,7539
	[g/kWh]	3.000	4.000	5.000
	4.000	197,19604	197,19606	197,19606
	6.000	197,19618	197,19609	197,19609
	8.000	197,20396	197,19612	197,19612
	10.000	197,25784	197,19943	197,19615
	[litri]	3.000	4.000	5.000
	4.000	143.306	142.183	142.183
	6.000	136.903	136.640	135.828
	8.000	131.365	130.596	129.520
	10.000	126.262	124.242	123.571
	[kWh]	3.000	4.000	5.000
	4.000	0,00	0,00	0,00
	6.000	959,94	959,94	959,94
	8.000	8.300,76	8.300,76	8.300,76
10.000	18.182,30	18.182,30	18.182,30	

Tabella 3.22 Valori del rendimento del motore, del suo consumo specifico, dei litri di combustibile e dei kWh erogati dalla batteria del porto nel mese di ottobre

Nel mese di ottobre si riporta il grafico della potenza fornita alla nave dal sistema motore ibrido-rete elettrica-batteria portuale nella figura 3.85. L'affermazione sul poco contributo della batteria portuale la si riscontra anche a livello visivo nella figura 3.85, nella quale l'area della voce "Da Batteria Banchina" è pressoché assente.

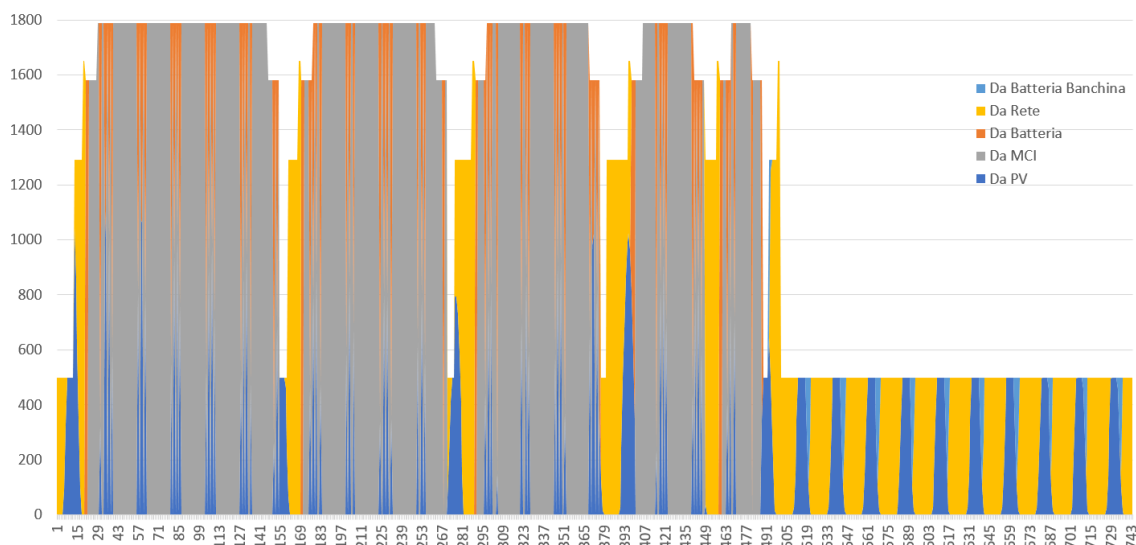


Figura 3.85 Potenza erogata alla nave nel mese di ottobre [kW - ore]

La distribuzione ottenuta in questo mese della potenza erogata dai sistemi energetici non motiva un investimento della batteria, questo siccome in questo modello gli si è data una dipendenza stagionale troppo evidente. La prima considerazione che ne segue è che in porto oltre alla sola batteria bisognerebbe prevedere un sistema energetico e quello più naturale da associare è uno che sfrutti l'energia dalle onde o delle maree. La prima idea è di sfruttare una di queste due fonti di energia siccome i porti in analisi sono insediati nell'oceano pacifico e in quello indiano, perciò si avranno delle onde con una energia potenziale elevata e le maree avranno anch'esse una grande variabilità.

RENDIMENTO PANNELLI FOTOVOLTAICI: 20%

La seguente sezione viene svolta come quella precedente, ma andando a variare il rendimento dei pannelli fotovoltaici, in particolare tale valore viene aumentato dal 17% al 20%.

Il contributo della batteria della banchina anche in questo caso resta minimo, anche se leggermente maggiore grazie ad un rendimento un po' più alto alla simulazione precedente.

		Capacità [kWh]		
[%]		3.000	4.000	5.000
Superficie [m ²]	4.000	42,7539	42,7539	42,7539
	6.000	42,7535	42,7539	42,7539
	8.000	42,7449	42,7535	42,7539
	10.000	42,7325	42,7499	42,7539
	[g/kWh]	3.000	4.000	5.000
	4.000	197,19606	197,19606	197,19608
	6.000	197,19807	197,19611	197,19611
	8.000	197,23795	197,19794	197,19614
	10.000	197,29543	197,21486	197,19620
	[litri]	3.000	4.000	5.000
	4.000	141.228	140.200	139.889
	6.000	133.798	132.985	132.674
	8.000	127.826	125.866	125.554
	10.000	121.099	119.114	118.745
	[kWh]	3.000	4.000	5.000
	4.000	0,00	0,00	0,00
	6.000	4.532,20	4.532,20	4.532,20
8.000	15.230,40	15.230,40	15.230,40	
10.000	27.143,00	27.143,00	27.143,00	

Tabella 3.23 Valori del rendimento del motore, del suo consumo specifico, dei litri di combustibile e dei kWh erogati dalla batteria del porto nel mese di ottobre

Nella tabella 3.23 i valori di capacità associate alle superfici sono aumentati per le superfici di 6.000 e 8.000 m² dimostrandoci il legame fra pannelli fotovoltaici e batteria sul motore diesel.

L'aumento del rendimento dei pannelli porta ad un aumento della potenza prodotta da essi, però ad una maggiore potenza prodotta dai pannelli deve seguire anche una maggiore capacità della batteria, per far sì che vengano rispettate le due condizioni imposte sulla carica della batteria, ovvero quella sul limite della potenza di carica e quella sulla capacità di riuscire ad immagazzinare l'energia prodotta dai pannelli. Il non verificarsi di tali condizioni farebbe sì che i pannelli indirizzino la loro produzione alla nave, nel caso essa risulti insufficiente per soddisfare la richiesta della nave e la batteria non sia capace di compensare la differenza allora si attiverà il motore diesel, che però lavorerà con carichi e perciò anche con rendimenti bassi.

3.3.9.5.5 CONCLUSIONI DELLA SIMULAZIONE 5

La simulazione 5 è stata fatta per determinare la relazione fra i pannelli fotovoltaici e la batteria della nave, in più si è deciso anche di esaminare l'impatto che avrebbe una batteria locata nel porto di arrivo del mese considerato sull'acquisto dell'energia elettrica dalla rete.

Riguardo il primo obiettivo si è riusciti a evidenziare che il dimensionamento della batteria deve venir fatto a posteriori del dimensionamento dei pannelli fotovoltaici, questo è dovuto al fatto che la batteria, nella logica di questa tesi, assume un ruolo di accumulatore degli eccessi di energia per far funzionare gli altri sistemi energetici alle condizioni più favorevoli. La batteria perciò deve compiere un ruolo di intermediazione fra pannelli fotovoltaici e il motore diesel per far sì che i pannelli non vadano a far calare il rendimento del motore e ad aumentare i consumi specifici. Come si è visto nelle tabelle un non corretto dimensionamento della batteria comporta l'ottenimento di un rendimento medio mensile molto inferiore rispetto al valore in cui si vorrebbe far funzionare il motore. Sempre osservando i risultati ottenuti si vede che i rendimenti medi mensili, aumentano all'aumentare della capacità della batteria, a parità di superficie dei pannelli, però se a una capacità ben precisa si ottiene un rendimento medio mensile massimo si ha che anche per tutte le capacità maggiori si otterrà un rendimento massimo. Fra l'insieme di valori di capacità alle quali è associato un rendimento massimo si deve fissare quello che ha capacità minimo. Questa scelta è dettata da due ragioni, la prima è prettamente economica, ovvero che il costo di una batteria con capacità più bassa avrà anche un costo minore, a parità di tecnologia. Il secondo motivo è legato alla facilità nella progettazione della nave, ovvero che si avrà un oggetto più ingombrante all'interno della nave e che sarà quindi più difficile da posizionare al suo interno a parità di dimensioni della nave. All'analisi grossolana svolta in questa simulazione ne dovrebbe seguire una più precisa andando a ricercare per ogni mese i valori di capacità necessarie per ottenere i rendimenti medi massimi del motore, facendo per ogni mese un *focus* negli intervalli fra il valore di capacità minimo a cui è associato il rendimento massimo del motore e il valore di capacità precedente. Per il raggiungimento del valore minimo nel mese analizzato si consiglia il metodo di bisezione fino ad ottenere il valore di capacità minimo per quel mese. Una volta fatto per ogni mese si avranno dodici valori di capacità associati alla batteria per fissato rendimento e superficie dei pannelli fotovoltaici, fra questi dodici valori la batteria dovrà avere il valore di capacità più alto.

Il secondo obiettivo della simulazione 5 era quello di esaminare l'impatto che una batteria presente nella banchina del porto avrebbe sulla nave. Il suo impatto dipende solamente dal rendimento e dalla superficie dei pannelli a causa della logica impostagli. La batteria presente nel porto può venir ricaricata solamente dai pannelli della nave in questa simulazione, perciò per basse produzioni di energia, in certi casi si è visto che non riesce mai a venir ricaricata. Per valori elevati di superficie si riescono ad avere anche dei contributi maggiori del 50% dell'energia che, nel caso convenzionale verrebbe comprata dalla rete elettrica. Nonostante il grosso contributo che darebbe è dubbia la sua realizzazione a causa che il suo utilizzo, per la petroliera in analisi, sarebbe di soli 10 giorni ogni 2 mesi. Quindi la progettazione di una batteria di queste dimensioni dovrebbe essere motivata da un suo utilizzo più frequente e quindi dalla presenza di più navi che la utilizzano in maniera alterna.

3.3.9.6 SIMULAZIONE 6

La funzione “Simulazione6” viene richiamata all’interno del codice quando nello *UseForm* “PotenzaPerOgniOraMese” viene scelto con la selezione di una casella. La casella riporta il nome “Cogenerativo” e selezionandola prima di lanciare il calcolo si fa sì che la simulazione 6 venga svolta.

Nella simulazione 6 si è inserito all’interno della logica un assetto cogenerativo della nave, ovvero che sia presente un doppio *output* utile da un singolo processo. In questo caso si avrà la cogenerazione nella nave durante la navigazione, in particolare solo durante le ore in cui il motore diesel è in funzione utilizzando parte del calore che verrebbe assorbito dai sistemi di raffreddamento o immesso in atmosfera verrà sfruttato.

In questo caso si è previsto che il calore al posto di perderlo viene destinato come *input* ad un gruppo frigorifero ad assorbimento. Per poter svolgere questa simulazione bisogna ipotizzare che nella nave sia presente una domanda frigorifera e si ipotizza inoltre che questa nel caso standard venga soddisfatta assorbendo elettricità. In questa configurazione, a causa di assenza di dati, si è scelto di fissare la domanda frigorifera come una percentuale della domanda totale.

La possibilità di soddisfare un’utenza frigorifera usando il calore prodotto dal motore ci permette di non alimentare con l’elettricità, che viene considerata una fonte di energia pregiata, così da abbassare il carico del motore diesel e diminuire il combustibile consumato. Dato che abbassando il carico diminuisce anche il rendimento, ed in seguito comporta un aumento del consumo specifico, allora si preferirebbe che il motore operasse a carico unitario. Permettere al motore di avere del margine per aumentare il suo carico fa sì che si possa, quando possibile, ricaricare la batteria anche nelle ore di navigazione a massima velocità, cosa che fino ad ora risultava possibile solo a valori di picco del fotovoltaico.

Come si vedrà il calore usato dal motore è molto basso rispetto a quello prodotto, anche se questo non è un male. Il calore non sfruttabile tramite il gruppo frigorifero ad assorbimento può venir recuperato per andare a riscaldare il greggio della petroliera per far sì che rimanga all’interno dei valori di specifica.

3.3.9.6.1 GRUPPO FRIGORIFERO AD ASSORBIMENTO

Il gruppo frigorifero ad assorbimento non è quello più comunemente usato, ma invece lo è quello a compressione. La differenza sta nel fatto che quest’ultimo assorbe l’elettricità per alimentare il processo, mentre il gruppo frigorifero ad assorbimento utilizza potenza termica.

Lo svantaggio per cui viene usato meno frequentemente è dovuto ad un costo impiantistico maggiore. Lo si può dedurre dal fatto che la sostituzione del compressore, presente in un gruppo frigorifero a compressione, avviene con un assorbitore, una pompa, uno scambiatore ed un generatore di vapore.

I gruppi frigoriferi ad assorbimento si differenziano da quelli a compressione anche per la differenza del fluido, in particolare nel caso ad assorbimento si hanno due fluidi che negli impianti più comunemente usati sono l’acqua e uno fra il bromuro di litio (LiBr) e l’ammoniaca (NH₃).

In figura 3.86 è riportato uno schema impiantistico di un gruppo frigorifero ad assorbimento che funziona con l' NH_3 .

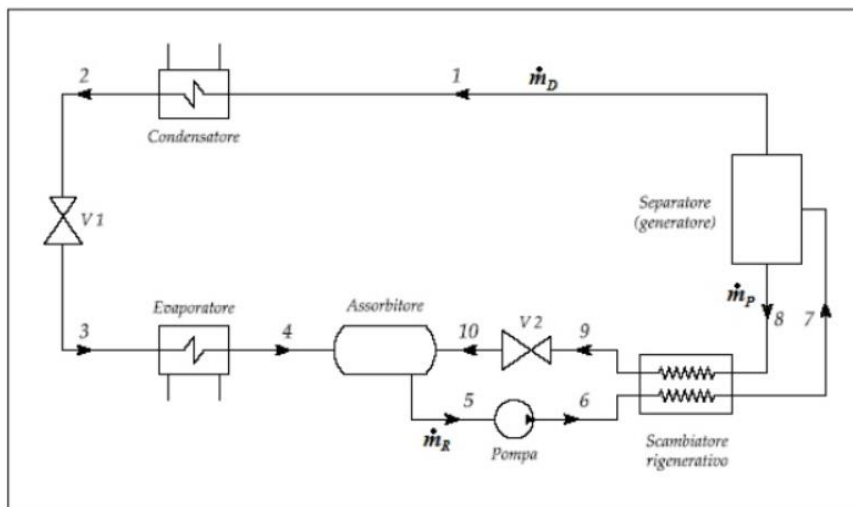


Figura 3.86 gruppo frigorifero ad assorbimento

Nel modello partendo dalla differenza di potenza fra la richiesta della nave e quella fornita dai pannelli si può arrivare ad una delle configurazioni, in funzione di altri parametri legati alla batteria, in cui il motore diesel è in funzione. Quando avviene questo, al funzionamento del motore, a seconda della potenza che sta erogando, gli è associato un determinato rendimento. Da esso si ricava il rendimento relativo al calore prodotto, che è stato fissato come il valore complementare del rendimento del motore diesel di un totale del 90%.

Per poter ricavarsi il calore che deve essere introdotto all'interno del gruppo frigorifero ad assorbimento e la potenza che il compressore assorbe in un gruppo frigorifero a compressione serve come valore noto il calore che deve essere sottratto dalla zona da raffreddare. Questo calore viene calcolato come una percentuale della domanda totale della nave. In questa simulazione si è fissato che sia il 20% della domanda totale.

Per ricavarsi le due grandezze che alimentano i gruppi frigoriferi devono essere noti i coefficienti di prestazione. Non essendo a conoscenza della presenza di una domanda frigorifera, non si è neppure a conoscenza di tali parametri, che però sono stati assunti pari a 5 per il gruppo frigorifero a compressione, mentre per il gruppo frigorifero ad assorbimento a 0,75.

Determinata la potenza del compressore, questa dev'essere scalato dal valore totale richiesto dalla nave. Questo viene fatto aggiungendo una colonna in più nella tabella del foglio "Simulazione6". Dalla richiesta residua si svolgono i calcoli fedelmente al caso standard con unica differenza che il motore dovrà erogare verso la nave una potenza minore, potendo così ricaricare la batteria in ogni ora. Questo permette di aumentare le ore in cui è in funzione la batteria, diminuendo di conseguenza il combustibile usato.

3.3.9.6.2 RISULTATI

Nel seguente paragrafo vengono riportati tutti i risultati della simulazione 6, ovvero contengono tutti i mesi, confrontando per ciascun mese i risultati di rendimenti, consumi specifici e combustibile con quelli che si ottengono nel caso standard.

A titolo d'esempio verranno riportati dei grafici della simulazione per poter argomentare le differenze riscontrate con la presenza di un gruppo frigorifero ad assorbimento. I grafici che verranno riportati sono tutti del mese di gennaio.

L'assetto cogenerativo, basandosi sul funzionamento del motore diesel, modifica solo le ore di navigazione, lasciando inalterate le ore in cui la nave si trova in uno dei porti. Il primo risultato da riportare è la potenza del compressore che, secondo l'impostazione del problema, può assumere i valori di 63,2 kW e 71,60 kW che rappresentano rispettivamente una domanda della nave di 1.580 kW e 1.790 kW. Le potenze che il compressore assorbirebbero vanno a ridurre la domanda della nave che perciò varia come è riportato in figura 3.87. Dal grafico della domanda della nave si notano dei picchi che fino ad ora non erano presenti, questo è dovuto al fatto che in tutte le ore in cui non ci sono tali picchi la domanda è stata diminuita della potenza del compressore. I picchi rappresentano le ore in cui la batteria è in scarica, con l'aiuto dei pannelli fotovoltaici, però in queste ore, non essendo in funzione il motore diesel, non si ha la riduzione della domanda della nave.



Figura 3.87 Richiesta della nave nel mese di gennaio [kW - ore]

Un risultato da evidenziare è che il calore prodotto dal motore viene usato solamente per il 24,13%, perciò ancora il 75,87% del calore prodotto non viene usato dal gruppo frigorifero. C'è da notare inoltre che essendo una petroliera si avrà una domanda di utenza termica per mantenere il greggio ad una determinata temperatura, così da far stare la viscosità all'interno delle specifiche. Perciò una quota parte non nota del calore, verrà impiegata per riscaldare il greggio che viene trasportato, e quindi anche se ci fosse una domanda maggiore di utenza frigorifera non potrebbe essere molto di più di quella assunta se si vuole soddisfarla con un gruppo frigorifero ad assorbimento.

Inoltre col calore prodotto dal motore si potrà anche soddisfare una domanda termica dovuta al riscaldamento dei locali interni alla petroliera.

Il sistema motore ibrido-rete elettrica con il gruppo frigorifero ad assorbimento eroga la potenza con la distribuzione riportata in figura 3.88.

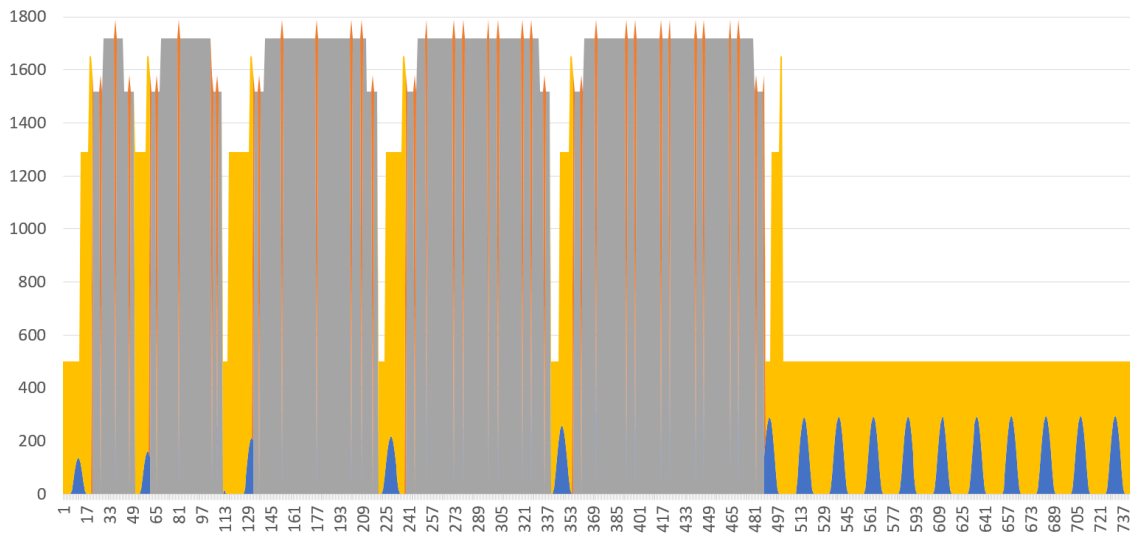


Figura 3.88 Potenza erogata alla nave nel mese di gennaio [kW – ore]

Come precedentemente detto, i periodi di *Port-Stay* sono identici al caso standard, nei periodi di navigazione sono proporzionalmente uguali nelle ore in cui il motore è in funzione, mentre nelle ore in cui lo è la batteria sono identici anche con i valori. Ovviamente, una ricarica più frequente della batteria permette anche alle scariche della batteria ad essere più frequenti, infatti osservando il grafico della SOC in figura 3.89 si possono osservare delle cariche della batteria più frequenti, senza la presenza di intervalli di tempo in cui la SOC rimane costante.

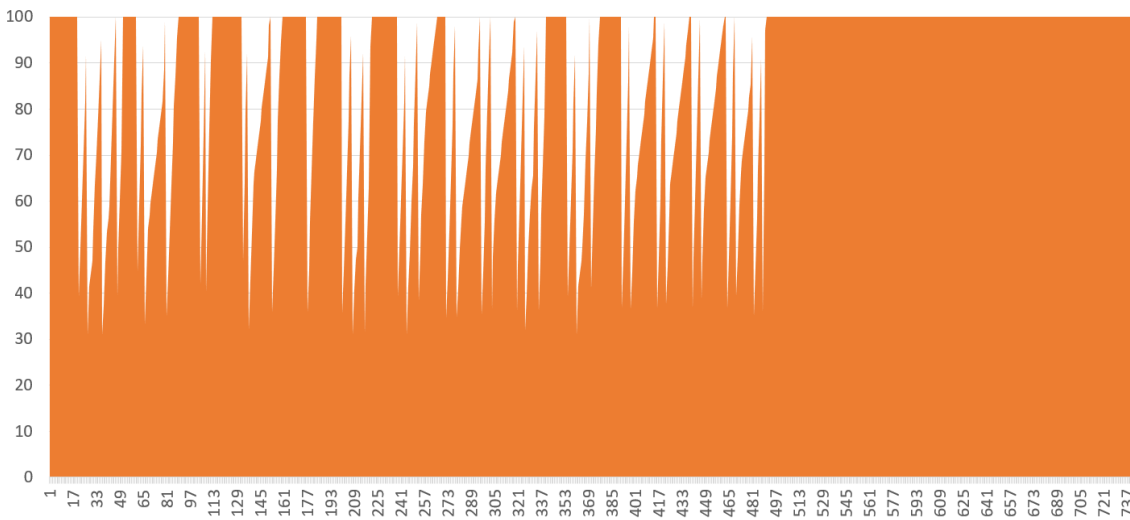


Figura 3.89 Grafico della SOC nel mese di gennaio

In seguito verranno riportati i valori nella tabella 3.24 i valori medi dei mesi di rendimento, consumo specifico e del combustibile usato. Nella suddetta tabella sono presenti, al contrario delle simulazioni precedenti, i risultati per ogni mese.

	Caso standard		
	Rendimento [%]	Consumo specifico [g/kWh]	Combustibile [litri]
Gennaio	42,7537	197,19693	149.926
Febbraio	42,7539	197,19603	148.850
Marzo	42,7539	197,19603	148.659
Aprile	42,7539	197,19603	148.539
Maggio	42,7539	197,19601	149.877
Giugno	42,7539	197,19604	149.662
Luglio	42,7538	197,19662	149.926
Agosto	42,7539	197,19601	150.020
Settembre	42,7539	197,19601	149.925
Ottobre	42,7539	197,19601	149.614
Novembre	42,7538	197,19624	150.738
Dicembre	42,7538	197,19641	150.068
	Simulazione 6 (Domanda frigorifera 20%)		
	Rendimento [%]	Consumo specifico [g/kWh]	Combustibile [litri]
Gennaio	42,7472	197,22673	144.859
Febbraio	42,7495	197,21651	144.039
Marzo	42,7500	197,21410	143.631
Aprile	42,7497	197,21530	142.508
Maggio	42,7475	197,22546	143.830
Giugno	42,7443	197,24023	144.605
Luglio	42,7469	197,22820	144.501
Agosto	42,7465	197,23012	144.502
Settembre	42,7486	197,22060	143.731
Ottobre	42,7490	197,21848	143.729
Novembre	42,7435	197,24419	145.779
Dicembre	42,7436	197,24338	146.232

Tabella 3.24 Valori del rendimento del motore, del suo consumo specifico, dei litri di combustibile nel mese di gennaio

Confrontando i valori riportati nella prima colonna “Rendimento” si osserva che il motore diesel è caratterizzato da dei rendimenti minori. La ragione per cui si ha un abbassamento del rendimento del motore diesel è che in alcune ore il motore opera a carichi minori, questo è dovuto all’abbassamento della potenza da erogare a causa della mancanza della potenza richiesta dal compressore. Il motore tenderà, come usuale in questo modello, ad operare ad un carico maggiore, questo significa che la potenza che non viene richiesta dalla nave verrà destinata alla batteria. Però in certe condizioni la batteria non è in grado di venir ricaricata, siccome non le si può destinare la potenza che il motore sarebbe capace di fornirle, e non può neppure scaricarsi, siccome non possiede una sufficiente energia o che si dovrebbe scaricare

con una potenza maggiore della potenza limite di scarica. Questo significa che il motore si troverà costretto ad abbassare il carico dal valore unitario desiderato a causa delle condizioni in cui ci si trova in quel momento, andando così a cambiare il rendimento. Ad una diminuzione del valore del rendimento segue un aumento del consumo specifico, che come detto rappresenta la quantità di combustibile usato a parità di energia prodotta.

Nonostante un rendimento più basso ed un consumo specifico maggiore, che è semplicemente dovuto all'inserimento del gruppo frigorifero ad assorbimento all'interno di un sistema che era stato progettato senza di esso, si riesce ad ottenere una riduzione del combustibile consumato. I valori del combustibile consumato nel mese non sono del tutto veritieri, ma risultano maggiori rispetto al valore che si riesce ad ottenere, perché durante una progettazione di un motore con un gruppo frigorifero ad assorbimento la batteria verrebbe scelta per far sì che la potenza limite di scarica della batteria sia adeguata a riuscire ad erogare anche quando la nave si trova al regime di massima velocità.

Il risparmio di combustibile per ogni mese risulta essere in media di 5.321 litri.

3.3.9.6.3 CONCLUSIONI DELLA SIMULAZIONE 6

Nella simulazione 6 si è previsto all'interno della dinamica del motore un gruppo frigorifero ad assorbimento, senza però andare ad alterare nessun parametro dei componenti del motore ibrido. Come visto il gruppo frigorifero ad assorbimento permette di abbassare la domanda della nave quando il motore diesel è in funzione, siccome va a sostituire il già presente gruppo frigorifero a compressione che viene alimentato da energia elettrica.

La presenza del gruppo frigorifero ad assorbimento non cambia il comportamento della distribuzione e dei valori fra il caso standard e la simulazione 6 per i periodi in cui è in porto. Inoltre nelle ore in cui è in navigazione non modifica il comportamento quando la batteria è in scarica.

Il gruppo frigorifero ad assorbimento, però, interviene sulla batteria, si potrebbe dire, in maniera indiretta siccome le permette che le ore fra una scarica e l'altra diminuiscano, grazie al fatto che, anche se non presente della potenza dai pannelli e la domanda della nave sia massima, possa venir ricaricata. Questo è possibile siccome viene a mancare la domanda della potenza del compressore che perciò può essere destinata alla ricarica della batteria. Questa grossa differenza dal caso standard permette alla batteria di venir ricaricata in qualsiasi ora durante la navigazione.

Il problema già esposto durante l'argomentazione dei valori ottenuti nella tabella 3.24, ma che risiede all'interno della logica del modello, è che la batteria non è sempre in grado di scaricarsi quando è carica, denotando un valore della potenza limite di scarica troppo basso per la sua applicazione, motivando l'affermazione che la batteria risulti sottodimensionata.

Dai litri di combustibile risparmiati in questa simulazione si potrebbe stimare in quanto tempo si potrebbe rientrare della spesa di un gruppo frigorifero ad assorbimento, anche se la presenza di esso non implica l'assenza del gruppo frigorifero a compressione siccome il primo può funzionare fornendogli calore, e quindi solo se il motore è in funzione. Una scelta che si potrebbe fare è però rimuovere il gruppo frigorifero a compressione ed usare una caldaia come fonte di calore per i periodi di tempo in cui non è in funzione il motore. C'è da tener presente che nella petroliera probabilmente sarà presente una caldaia che dovrebbe servire per l'utenza termica ed il mantenimento del petrolio nelle specifiche, perciò in caso di presenza della caldaia a bordo sarebbe possibile la sostituzione del gruppo frigorifero, anche se nelle ore in cui non è in funzione il motore, risulterà sconveniente.

CAPITOLO 4

CONCLUSIONI

Questa tesi si è concentrata sullo sviluppo di un codice per simulare un motore navale di una petroliera. Al caso convenzionale, ovvero del solo motore ibrido, si è aggiunto il comportamento che avrebbe la nave se usasse il cold ironing.

Il cold ironing si pone per risolvere il problema dell'inquinamento atmosferico dovuto alle emissioni delle navi, riducendone le emissioni solamente nei periodi in cui la nave si trova ormeggiata in porto, permettendo lo spegnimento dei motori e quindi avendo così la cessione di inquinanti prodotti dalla nave. Far sì che la richiesta energetica della nave venga soddisfatta dalla rete elettrica e non dal motore della nave non significa che le emissioni d'inquinanti siano nulle.

L'inquinamento associato all'energia elettrica prodotta *on-shore* è minore rispetto a quella che viene prodotta sulla nave, però in contrasto a questa visione ambientalista ci sono gli aspetti economici da considerare. A disincentivare l'utilizzo del cold ironing è il fatto che è più conveniente produrre energia a bordo della nave che acquistarla dalla rete.

Per migliorare il cold ironing, con un'ottica delle emissioni prodotte, gli si dovrebbe associare una produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile, come si è cercato di introdurre nell'ultima configurazione.

All'interno della tesi sono stati svolti sette casi: motore ibrido con cold ironing, motore diesel, motore diesel con cold ironing, motore ibrido con cold ironing con i valori di rendimento e superficie dei pannelli fotovoltaici modificabili, motore ibrido con cold ironing con il valore della capacità della batteria modificabile, motore ibrido con cold ironing ed accumulatore nel porto di destinazione, motore ibrido con gruppo frigorifero ad assorbimento e cold ironing.

Confrontando la simulazione 1, ovvero di motore diesel, con la simulazione 2, che è il motore diesel con cold ironing, ci permette di capire il contributo del solo cold ironing. Questo caso in cui la nave è costretta a passare un elevato numero di ore in porto permette un risparmio elevato di combustibile ed una riduzione elevata di inquinanti emessi nelle aree portuali ed in quelle limitrofe.

Le simulazioni 3 e 4 sono servite per indagare rispettivamente l'influenza dei pannelli fotovoltaici e della batteria sui consumi della nave a parità di motore diesel.

Nella simulazione 3 si è visto che aumentando solamente la superficie ed il rendimento dei pannelli si ottiene una riduzione del combustibile, cosa alquanto ovvia, però continuando ad aumentare questi due valori o anche solo la superficie si iniziano ad ottenere man mano valori decrescenti del rendimento del motore diesel. Il decremento del rendimento è causato da un dimensionamento non corretto della batteria. Un'altra considerazione tratta dalla simulazione 3 è la possibilità di prevedere un accumulatore nel porto in cui la nave stazionerà a fine percorso. Come ripetuto più volte nella tesi, il tallone d'achille del cold ironing è che non è economicamente conveniente; dalla simulazione 3 si è ottenuto che, da una certa metratura insù, nel periodo di *Port-Stay*, i pannelli fotovoltaici immettono nella rete elettrica una quantità di elettricità dello stesso ordine di grandezza della richiesta notturna. Con la logica del cold

ironing imposta al modello risultava sconveniente siccome, in pratica, si riacquista la stessa quantità di energia che veniva ceduta durante le ore del giorno, ma ad un prezzo maggiore. Per evitare questo si è pensato di aggiungere due batterie, una nel porto di Dalian e l'altra nel porto di Aden. Le batterie devono essere correttamente dimensionate, ovvero devono poter assorbire il valore minimo fra la richiesta energetica della nave nel periodo notturno e l'energia prodotta in eccesso dai pannelli fotovoltaici durante il giorno. Inoltre bisognerà permettere di potersi ricaricare entro la potenza massima prodotta dai pannelli fotovoltaici e di scaricarsi fino alla potenza richiesta dalla nave.

Nella simulazione 4 si è indagata l'influenza della capacità della batteria, e si è ottenuto che la batteria, fino ad un certo valore non partecipa in alcun modo all'erogazione di energia e di conseguenza non è in grado neppure di ricaricarsi. Questo è dovuto al fatto che non ha una dimensione sufficiente per erogare energia alla potenza richiesta per un'ora. Dai risultati ottenuti si è visto che il suo contributo nella diminuzione del combustibile usato, superato il valore minimo tale per cui sia in grado di scaricarsi, è molto rilevante e questo a causa di due ragioni. La prima è che scaricandosi è possibile anche ricaricarla, così evitando che la potenza prodotta dai pannelli vada ad abbassare il carico del motore diesel, la seconda ragione è che scaricandosi permette al motore di non essere in funzione in quelle ore.

Dalla considerazione fatta dalla simulazione 3 si è deciso durante lo sviluppo della tesi di aggiungere la simulazione 5, che oltre ad andare a ricercare il legame tra i pannelli fotovoltaici e la batteria, è servita pure ad esaminare il contributo di una batteria nel porto di arrivo.

Dalla simulazione 5 si è ottenuta la considerazione che ad una fissata potenza prodotta dai pannelli esiste un valore "ideale" di capacità. Come evidenziato nella simulazione 3 una batteria sottodimensionata non risulta utile, però è necessario capire che capacità debba avere la batteria fra tutti i valori per cui è capace di scaricarsi. Con la simulazione 5 si è visto che ad una superficie fissata è associata una capacità tale per cui il rendimento del motore è massimo e si osserva che un aumento della capacità da tale valore non modifica più il rendimento e il consumo specifico del motore, ma modifica solo il consumo di carburante. La riduzione del combustibile per valori crescenti di capacità è dovuta solamente ad un numero crescente di scariche grazie però all'energia assorbita dalla rete elettrica e quindi la capacità extra datagli viene utilizzata solamente nella prima scarica della batteria per ogni volta che lascia un porto. Il secondo aspetto della simulazione 5 ci ha permesso di ottenere delle riduzioni dell'energia elettrica prelevata dalla rete. Si è visto che per valori più bassi di superficie dei pannelli fotovoltaici, nel caso in cui la batteria venga ricaricata solamente dai pannelli presenti sulla nave, non è necessaria la presenza della batteria in banchina, ma che l'energia prodotta in eccesso potrebbe essere assorbita dalla batteria già presente nella nave per poi erogarla durante la notte. Per superfici crescenti risultano evidenti le lacune della sola batteria della nave e si motiva sempre più la presenza di una batteria in banchina.

Nell'ottica di prevedere una batteria nel porto bisogna tener conto che il suo utilizzo non può essere di un'unica nave, ma bisogna che venga utilizzata da più navi.

Nell'ultima simulazione svolta si è introdotto un assetto cogenerativo alla petroliera, prevedendo che il calore prodotto dal motore diesel venga usato per alimentare un gruppo frigorifero ad assorbimento. Il calore che assorbirà non potrà essere troppo elevato siccome la nave, essendo una petroliera, sarà già dotata di un sistema di recupero termico per fornire calore al greggio, mantenendolo entro i valori di specifica per il trasporto.

BIBLIOGRAFIA

- [1] World energy balances: Overview, International Energy Agency (IEA), 2019;
- [2] World energy outlook, IEA, 2018;
- [3] Transportation sector energy consumption, Environmental Investigation Agency (EIA), 2016;
- [4] Causality between energy consumption and economic growth in India: a note on conflicting results, Shyand Paul & Robidra N. Bhattacharya, 2004;
- [5] D.P.R. 435 del 8/11/1991u supplemento ordinario alla Gazzetta Ufficiale n°17 del 22/01/1992;
- [6] Emissions of maritime transport: a reference system, L. Schrooten, Ina De Viefieger, Lue Int Panis, Cosimo Chiffi, Enrico Pastori, 2009;
- [7] Vessel-Source Marine Pollution: The law and politics of International Regulation, Allan Khee-Jin Tan, 2005;
- [8] Website of IMO: www.imo.org;
- [9] MARPOL 73/78: The Challenges of Regulating Vessel-Source Oil Pollution, M.Szepes, 2013;
- [10] Website of Gazzetta Ufficiale: www.gazzettaufficiale.it Regolamentazione per la prevenzione dell'inquinamento dovuto alle navi;
- [11] <https://www.researchgate.net>;
- [12] Assessment of Alternative Maritime Power (Cold Ironing) and Its Impacts on Port Management and Operations, R.Fiadomor, 2009;
- [13] Designing Cold Ironing Power System, D.Paul, K.Paterson, P.R.Chavdarin, 2014;
- [14] Air pollution from ships in ports: The socio-economic benefit of cold-ironing technology, F.Bollini, R.Bozzo, 2015;
- [15] Electrical characteristics of cold ironing energy supply for berthed ships, E.A.Sciberras, B.Zohawi, D.J.Atkinson, 2015;
- [16] Design Cold Ironing Power Systems: Electrical Safety During Ship Berthing, D.Paul, K.Peterson, R.Chavdarian, 2014;
- [17] Cold Ironing and onshore generation for airborne emission reductions in ports, E.A.Sciberras, B.Zohawi, D.J.Atkinson, 2014;
- [18] Shore Power Technology Assessment at U.S. Ports, EPA, 2017;
- [19] Assessment of opportunities and limitations for connecting cruise vessels to shore power, Bersen og Omland Houneuesen, 2018;
- [20] Trasporto marittimo e gestione ambientale delle aree portuali italiane, ISPRA, 2016;

- [21] Cold ironing: analisi di fattibilità e implementazione nel porto di Genova, M. Canepa, 2014;
- [22] Pounder's marine diesel engines and gas turbines, Doug Woodyard, 2009;
- [23] Sistemi energetici – impatto ambientale, M.Bianchi, A.De Pascale, A.Gambarotta, A.Peretto, 2008;
- [24] Increased use of LNG might not reduce maritime GHG emissions at all, E.Lindstand, 2019;
- [25] Supplemento ordinario alla Gazzetta Ufficiale, 13/01/2017;
- [26] Fondamenti ed applicazioni di propulsione navale, G.Trincas, 2010;
- [27] Meccanica, macchine ed energia, G.Cagliero, 2012;
- [28] Nozioni di macchine marine, A.Boesso, 2004;
- [29] Basic ship propulsion, J.P. Ghose R.P.Gokarn, 2004;
- [30] Studio e sviluppo di un motore a 2 T diesel veloce di nuova concezione per applicazioni automobilistiche, C.A.De marco, 2008;
- [31] Ciclo otto e ciclo diesel, S.Andorno, 2007;
- [32] Corso di impianti di propulsione navale, Accademia militare, F.Balsamo, Aa 2011/12;
- [33] Sistemi energetici: complementi, M.Bianchi F.Melino A.Peretto, 2008;
- [34] Cogeneration & Trigeneration: How to produce energy efficiently, Dr. Fromme Internation Consulting, 2016;

ABBREVIAZIONI & ACRONIMI

AMP: Alternative Maritime Power
AT: Alta Tensione
BOG: Boil Off Gas
Btu: British thermal unit
CFC: Clorofluorocarburi
CHP: Combined Heat and Power
CCHP: Combined Cooling Heating and Power
CODAD: Combined Diesel and Diesel
CODAG: Combined Diesel and Gas
CODOG: Combined Diesel or Gas
COGAG: Combined Gas and Gas
COGOG: Combined Gas or Gas
COSAG: Combined Steam and Gas
ECA: Emission Control Area
EIA: Enironmetal Investigation Agency
EPA: Environmental Protection Agency
GWP: Global Warming Potential
GNL: Gas Natural Liquid
HC: Idrocarburi incombusti
HCFC: Idroclorofluorocarburi
HFO: Heavy Fuel Oil
IEA: International Energy Agency
IEC: Internation Elettrotechnical Commission
IEEE: Institute of Electrical and Eletronics Engineers
IMO: International Maritime Organization
IMCO: Inter-Government Maritime Consultative Organization
ISO: International Organization for Standardization
LNG: Liquified Natural Gas
MARPOL: Maritime Pollution
MEPC: The Marine Environment Protection Commitee
MDO: Marine Diesel Oil
MGO: Marine Gas Oil
MT: Media Tensione
Mtoe: Millions tonnes of oil equivalent
NECA: Nitrogen Emission Control Area
NNI: No Net Increase
ODP: Ozone Depleting Potential
ODS: Ozone-depleting Subsatances

OECD: The Organization for Economic Co-operation and Development
PCB: Potenza di Carica limite della Batteria
PM: Particolato atmosferico
PMI: Punto Morto Inferiore
PMS: Punto Morto Superiore
PSB: Potenza di Scarica limite della Batteria
Rpm: Revolutions per minute
SCR: Selective Catalytic Reduction
SECA: Sulfur Emission Control Area
SOC: State Of Charge
SOLAS: Safety Of Life At Sea
SSLNG: Small Scale LNG
TSPP: Tanker Safety and Prevention of Pollution
Udm: Unità di misura
VAN: Valore Attuale Netto
VBA: Visula Basic for Application
VOC: Volatile Organic Compounds

ELEMENTI E COMPOSTI CHIMICI

Ca(OH)_2 : Idrossido di calcio

CH_4 : Metano

C_2H_6 : Etano

C_3H_8 : Propano

C_4H_{10} : Butano

CO : Monossido di carbonio

CO_2 : Anidride Carbonica

$\text{CO(NH}_2)_2$: Urea

H: Idrogeno atomico

LiBr: Bromuro di litio

O: Ossigeno atomico

O_2 : Ossigeno molecolare

OH: Radicale ossidrilico

NO_x : Ossidi di azoto

N: Azoto atomico

N_2 : Azoto molecolare

NCO: Cianato

NH_3 : Ammoniaca

$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$: Solfato di ammonio

NO: Monossido di azoto

NO_2 : Diossido di azoto

N_2O : Protossido di azoto

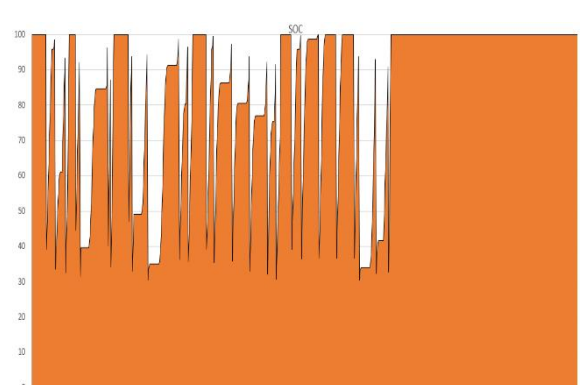
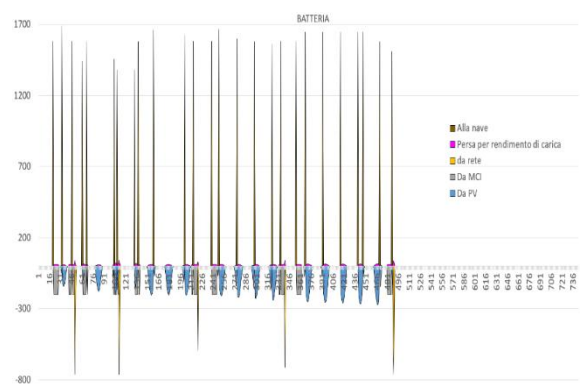
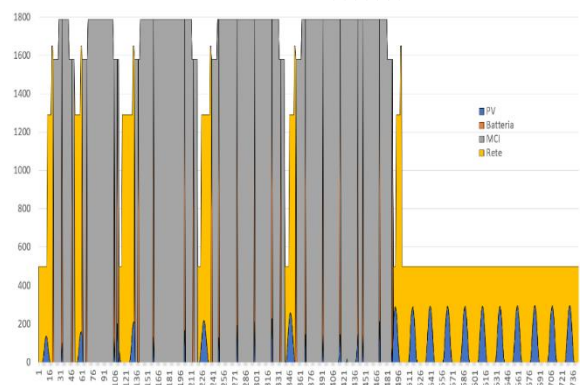
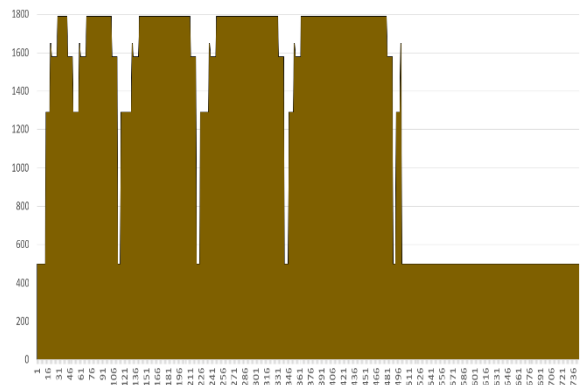
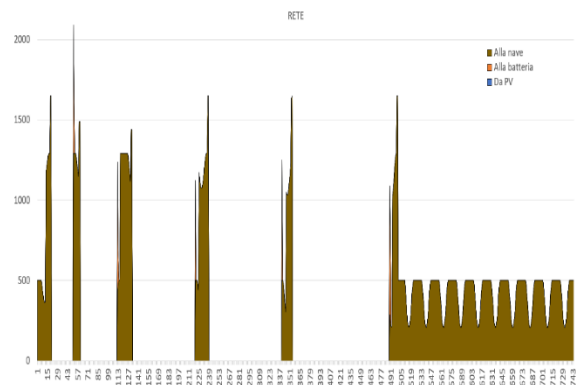
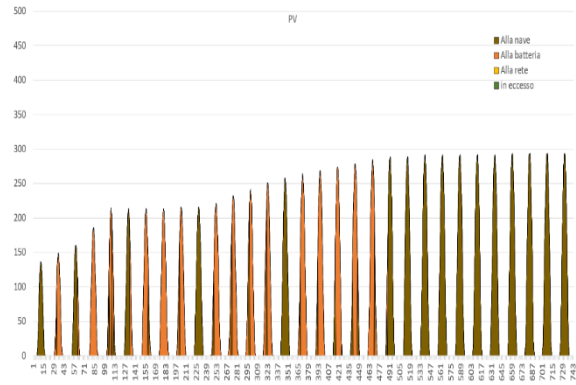
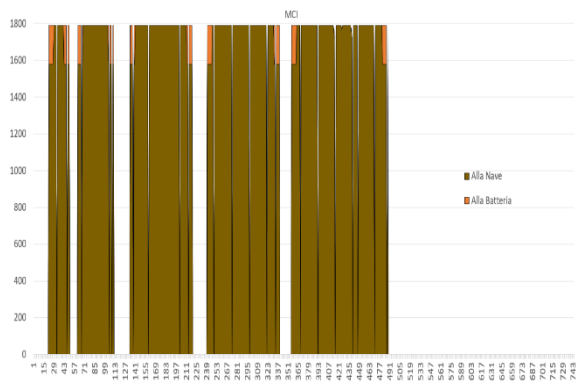
SO_x : Ossidi di zolfo

SO_2 : Diossido di zolfo

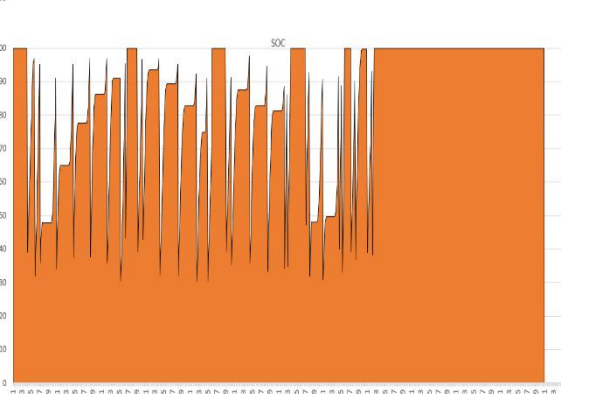
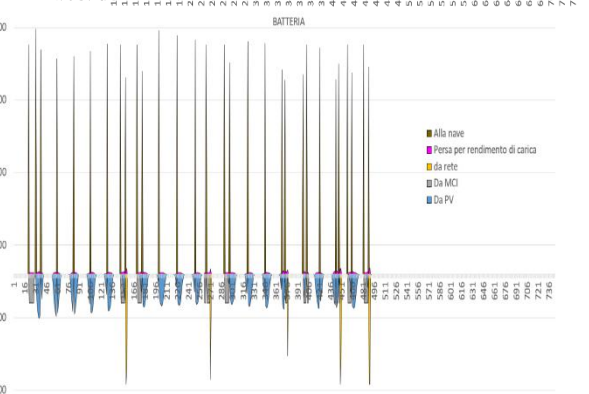
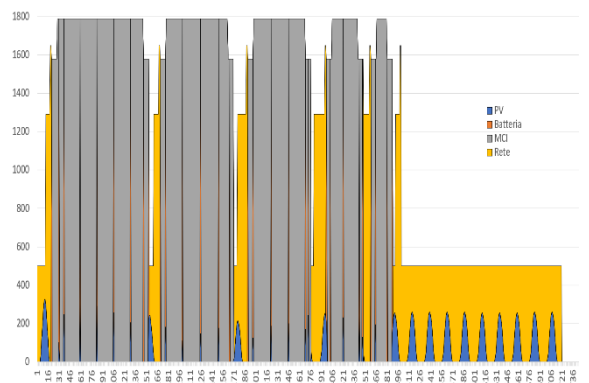
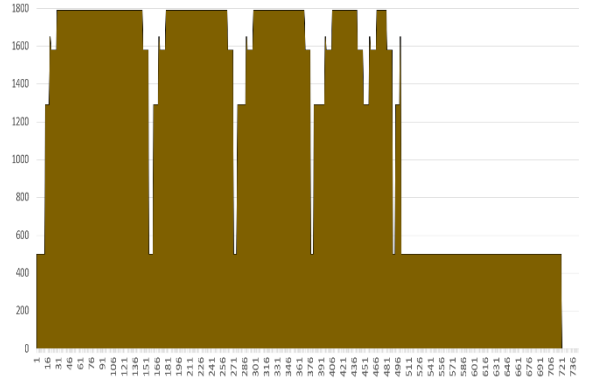
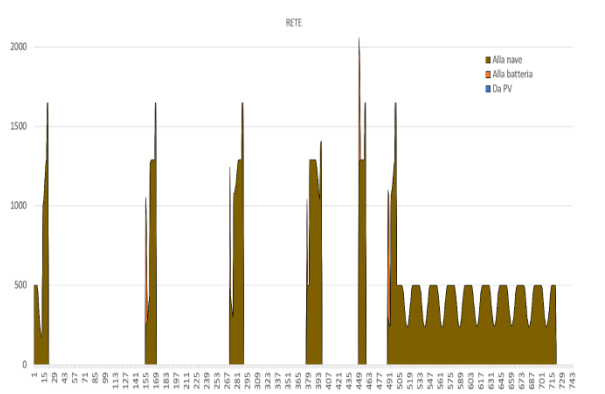
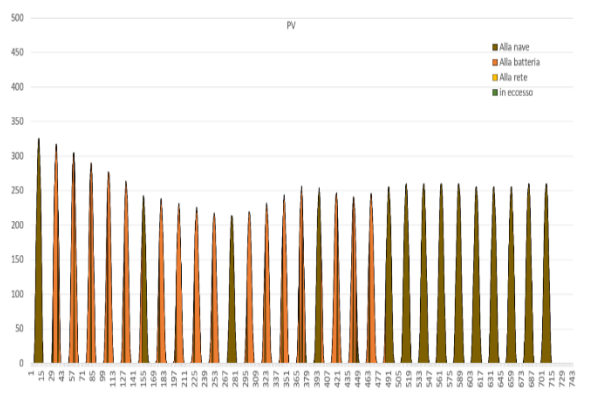
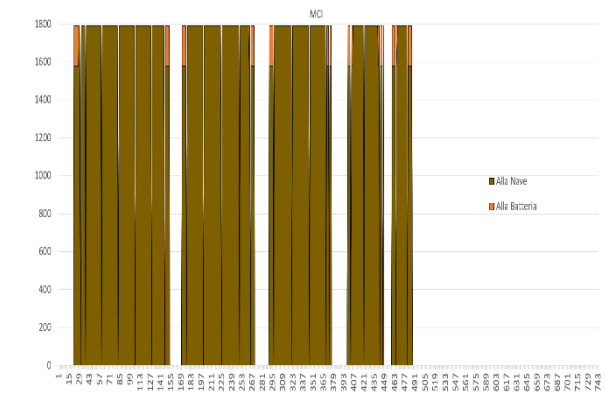
SO_3 : Triossido di zolfo

APPENDICE A

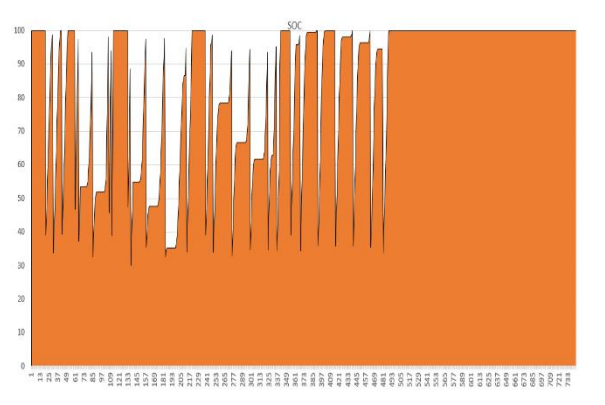
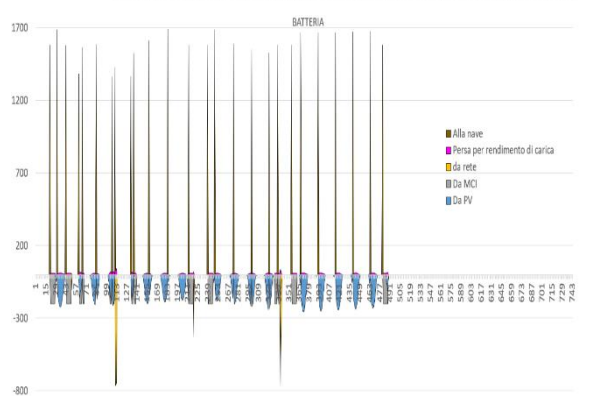
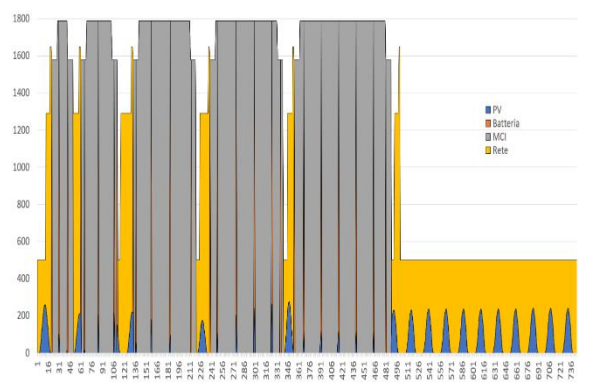
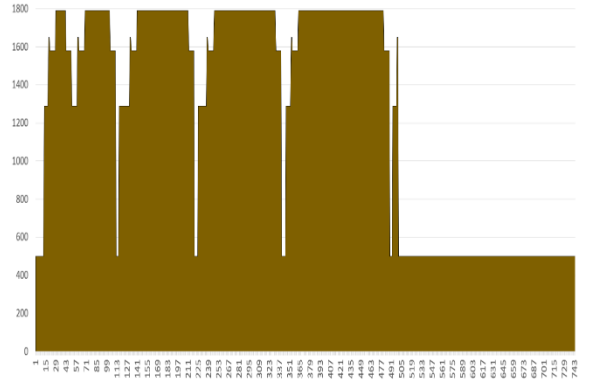
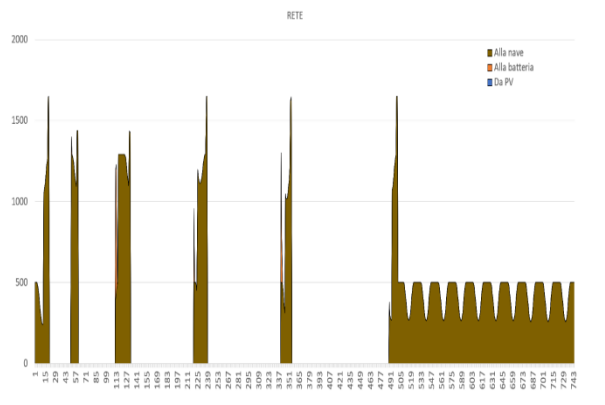
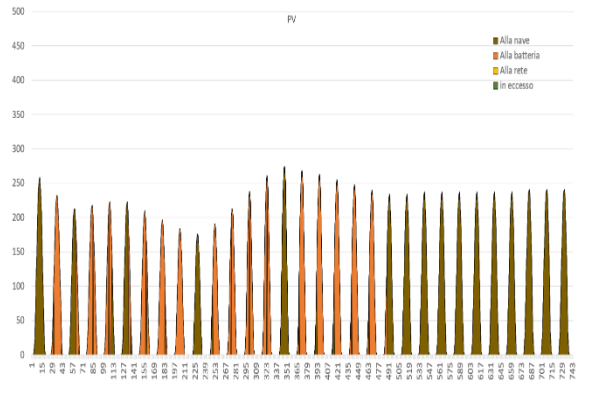
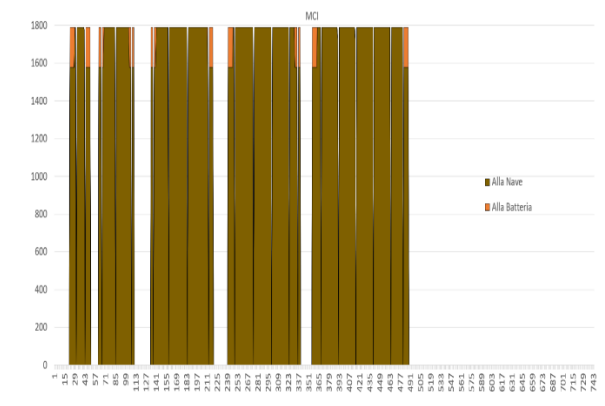
Caso base - Gennaio [kW – ore]



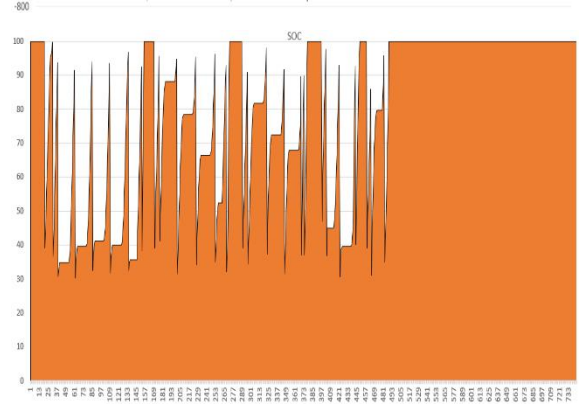
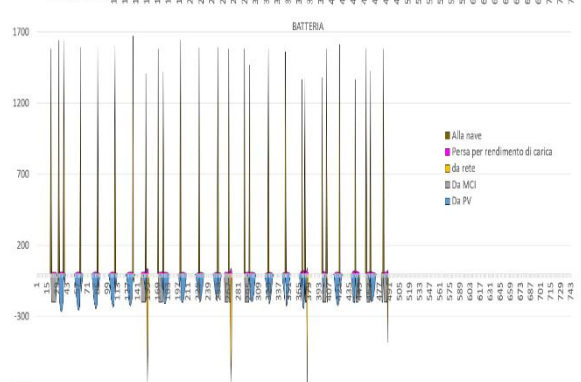
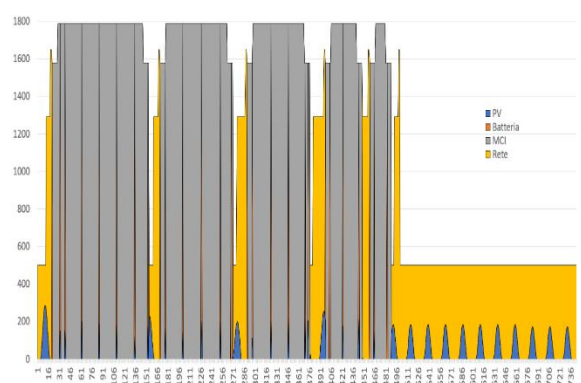
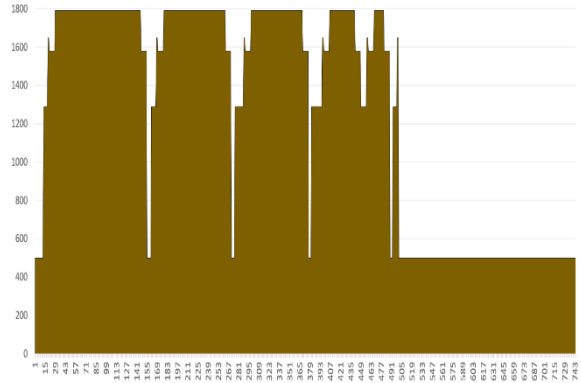
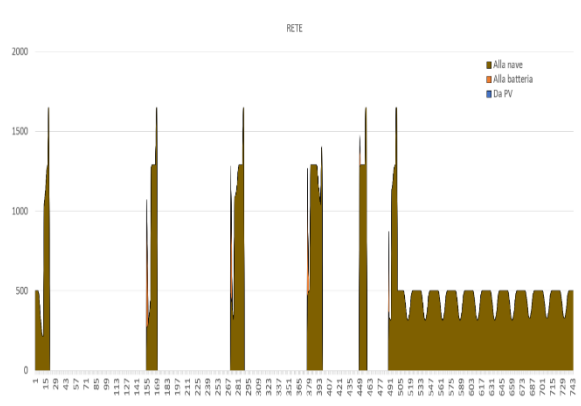
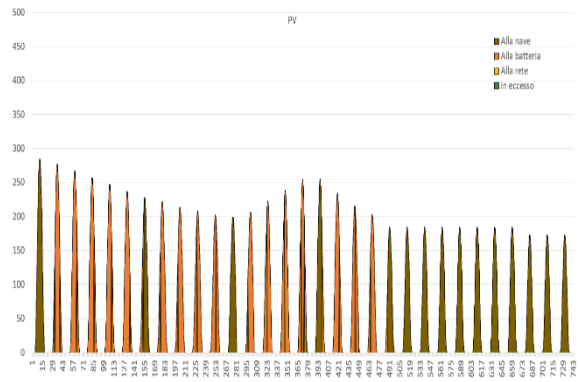
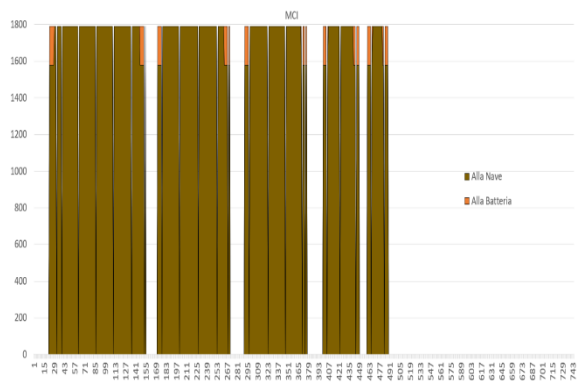
Caso base - Aprile [kW – ore]



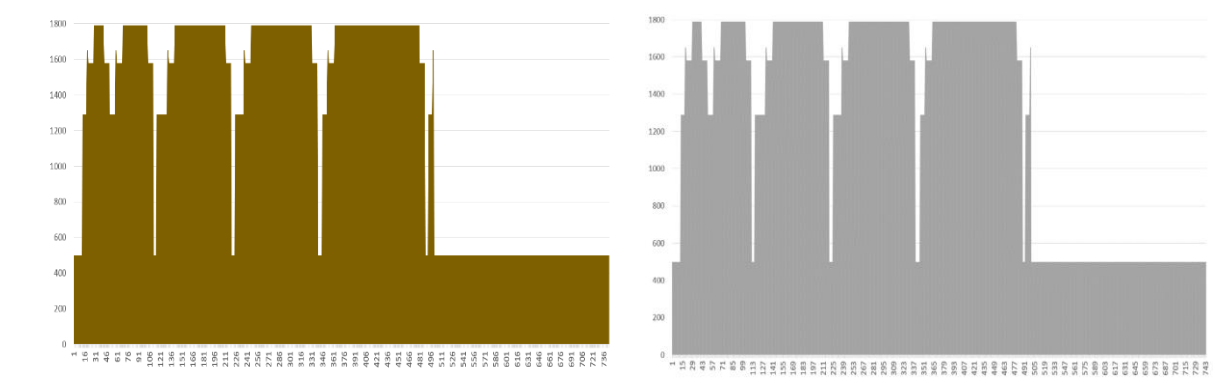
Caso base - Luglio [kW - ore]



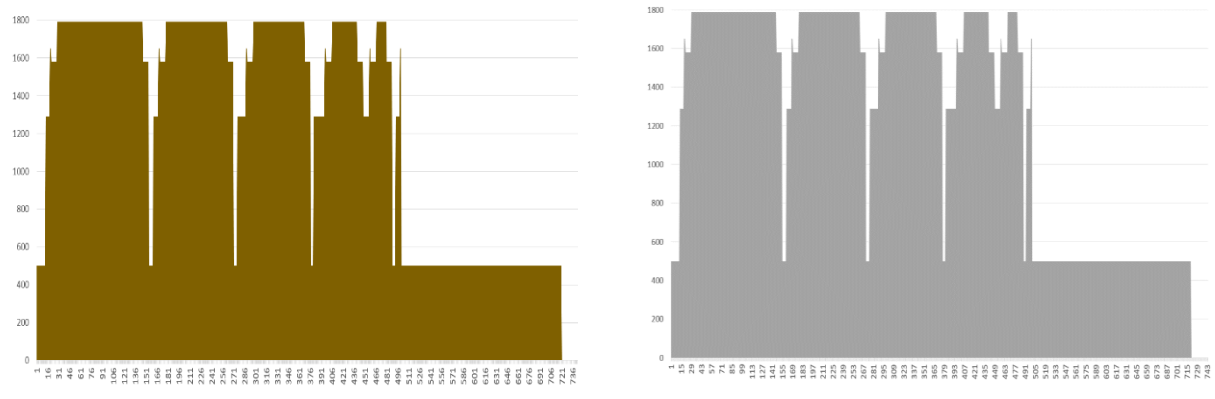
Caso base – Ottobre [kW -ore]



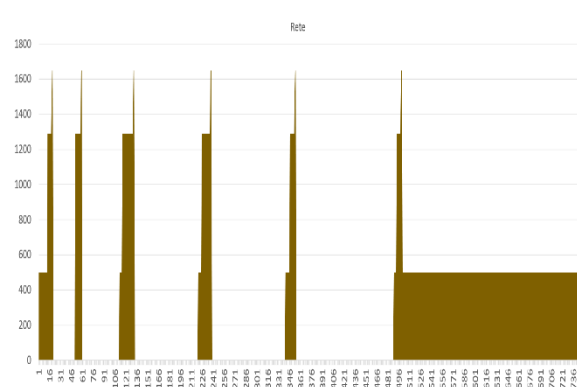
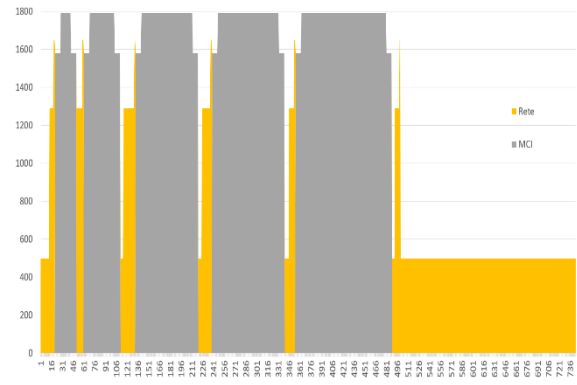
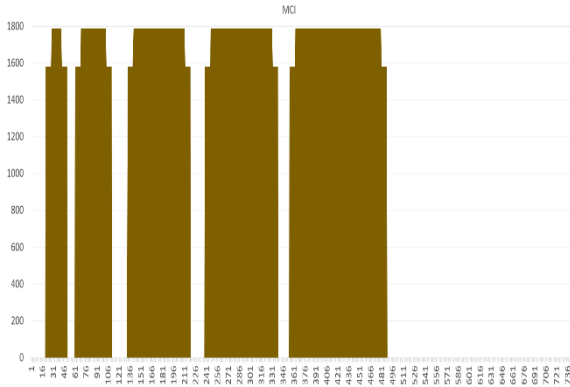
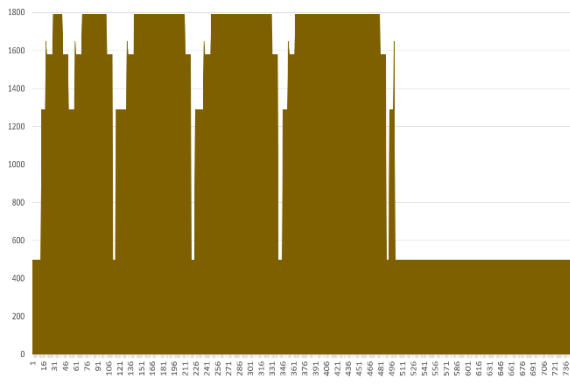
Configurazione 1 – Gennaio e Luglio [kW -ore]



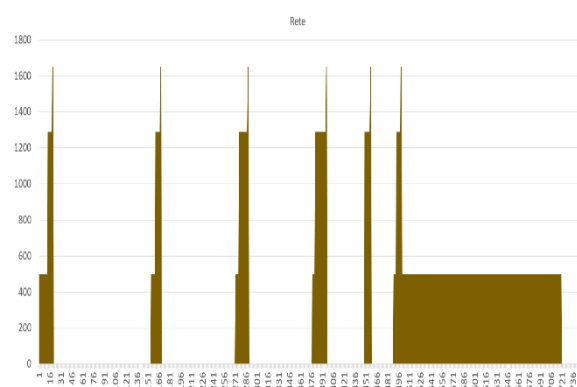
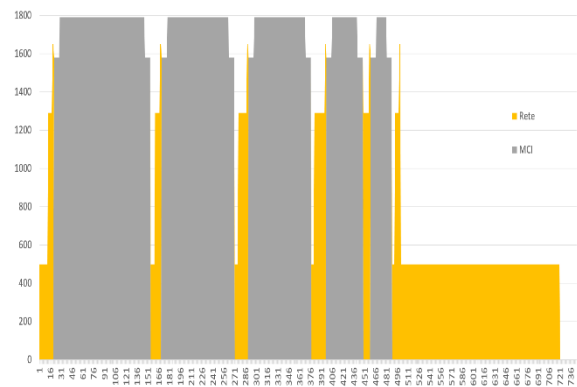
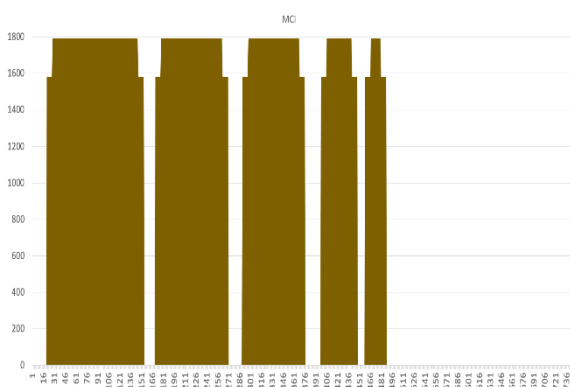
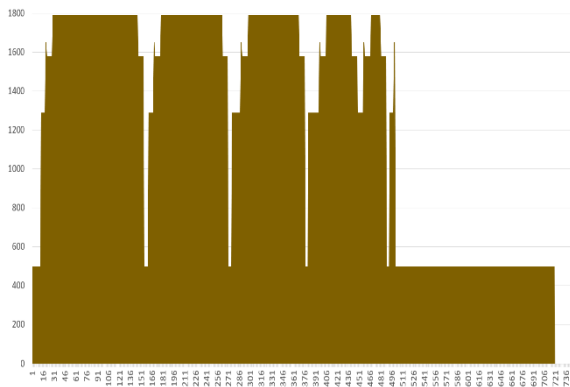
Configurazione 1 – Aprile e Ottobre [kW -ore]



Configurazione 2 – Gennaio e Luglio [kW -ore]



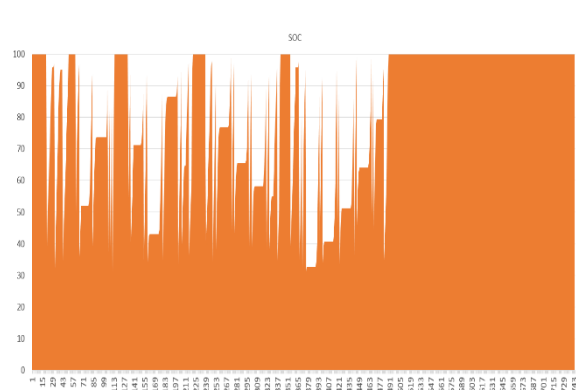
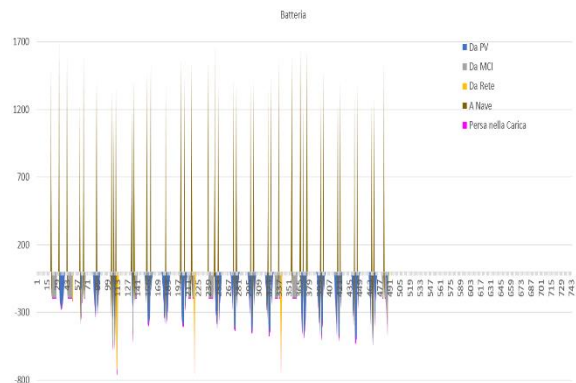
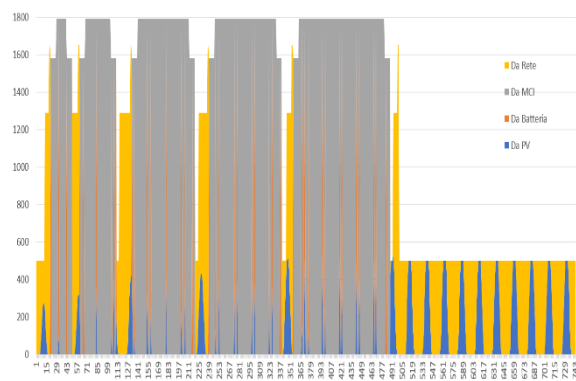
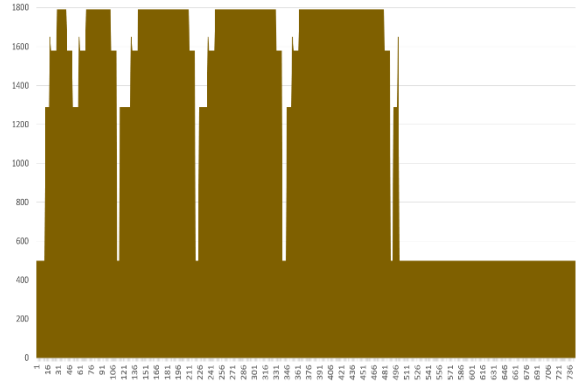
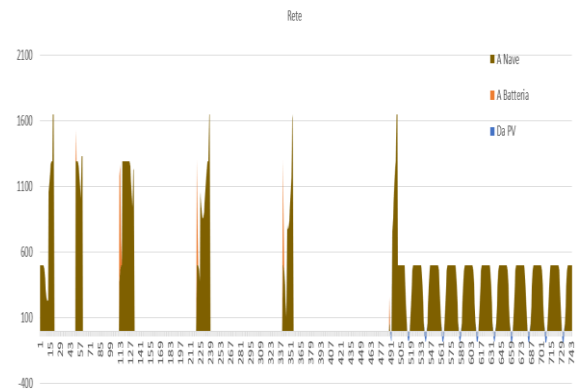
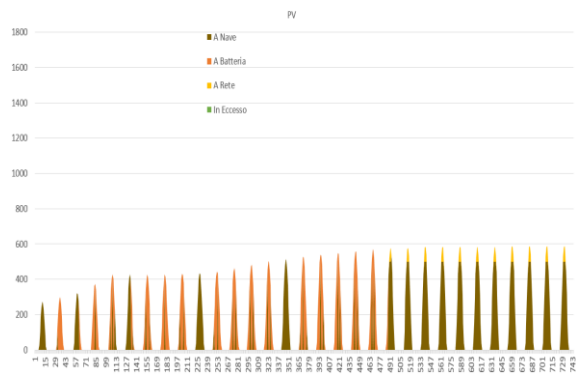
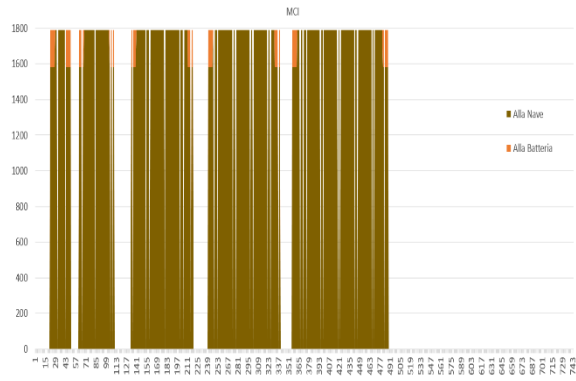
Configurazione 2 – Aprile e Ottobre [kW -ore]



Configurazione 3 – Gennaio [kW - ore]

Rendimento = 17%

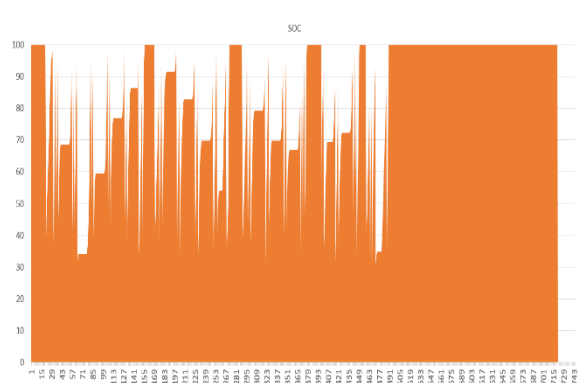
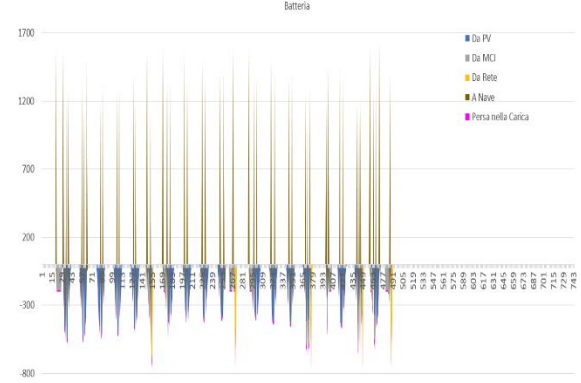
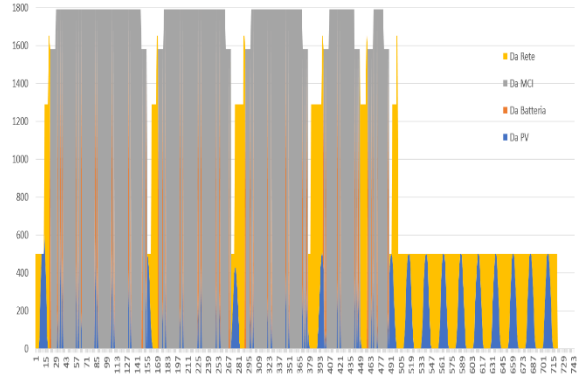
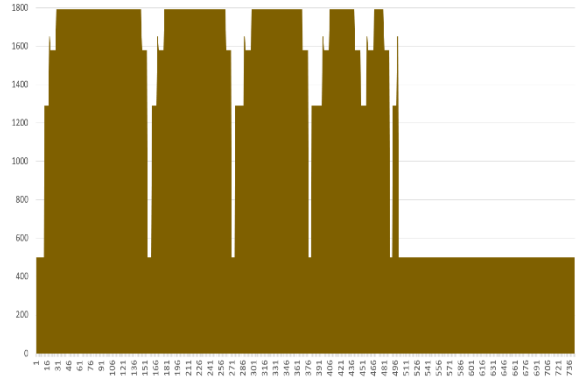
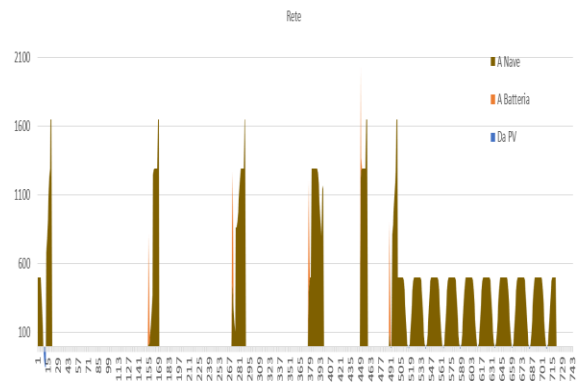
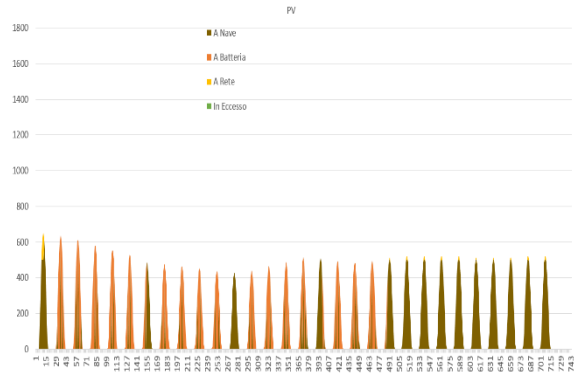
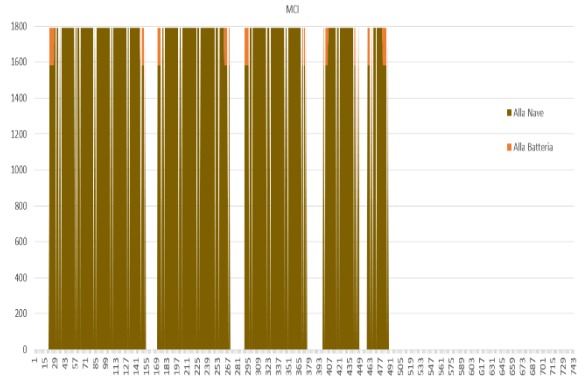
Superficie = 4.000 m²



Configurazione 3 – Aprile [kW -ore]

Rendimento = 17%

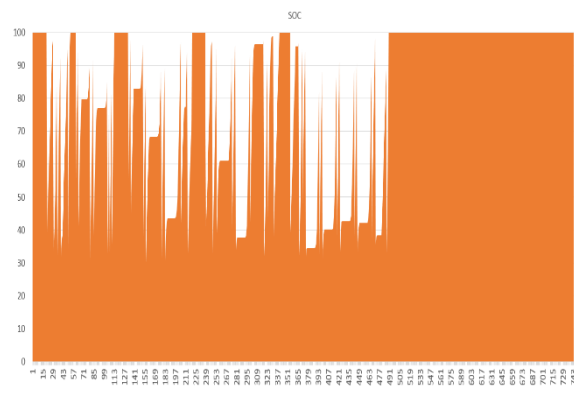
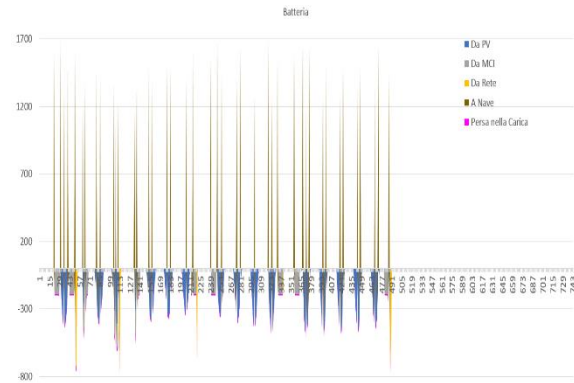
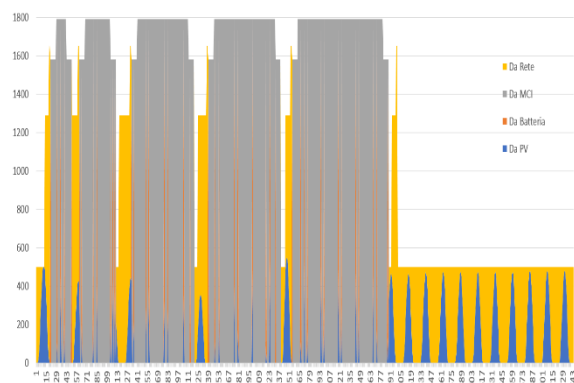
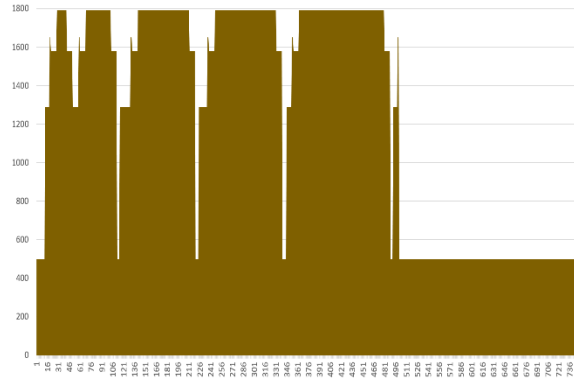
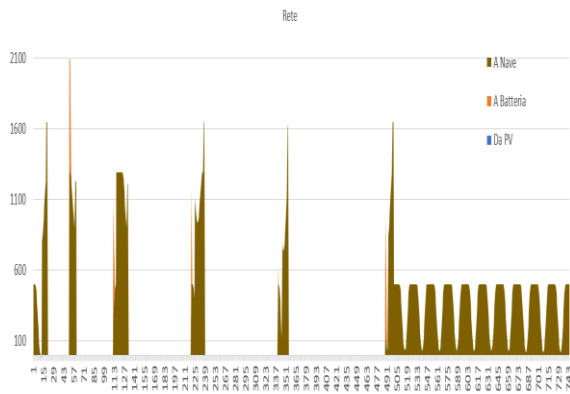
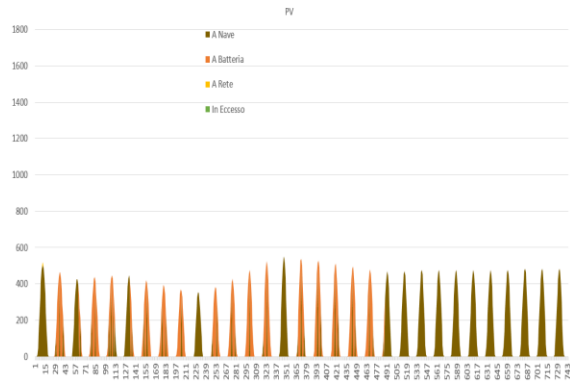
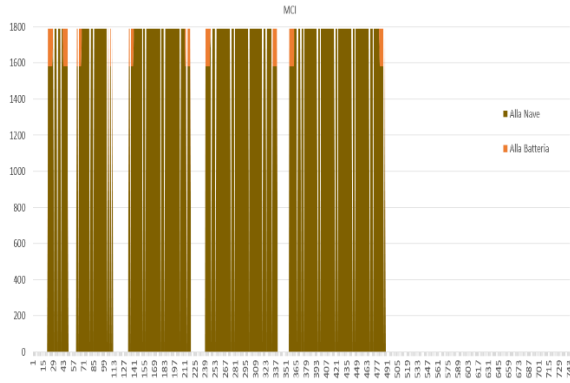
Superficie = 4.000 m²



Configurazione 3 – Luglio [kW -ore]

Rendimento = 17%

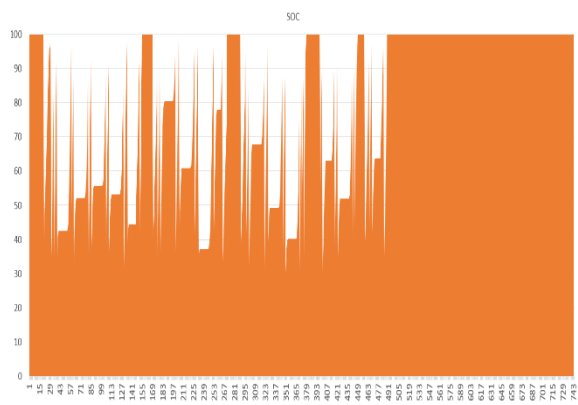
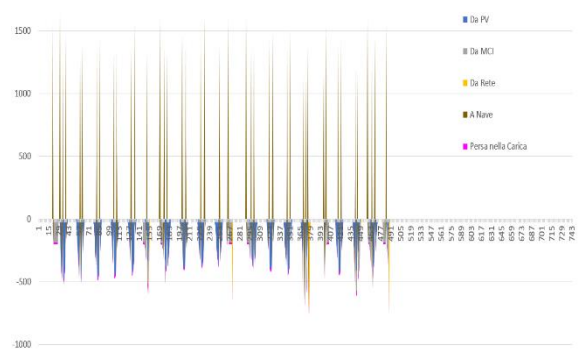
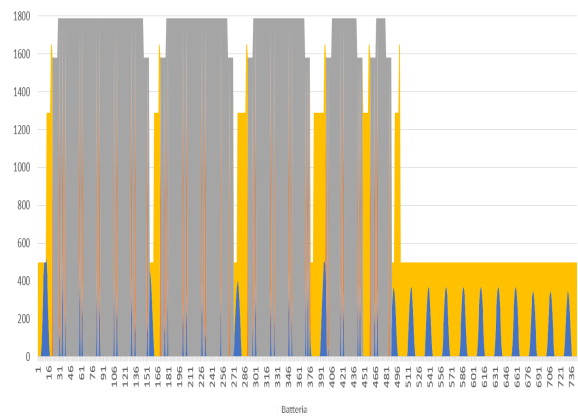
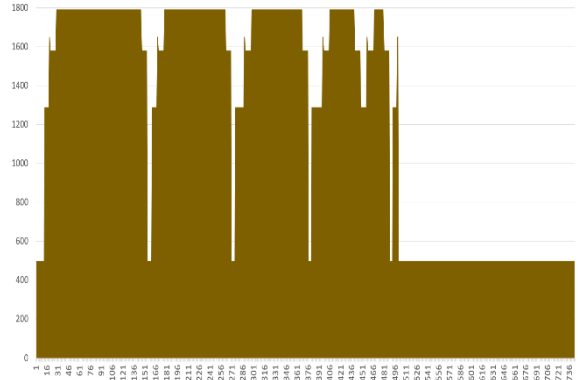
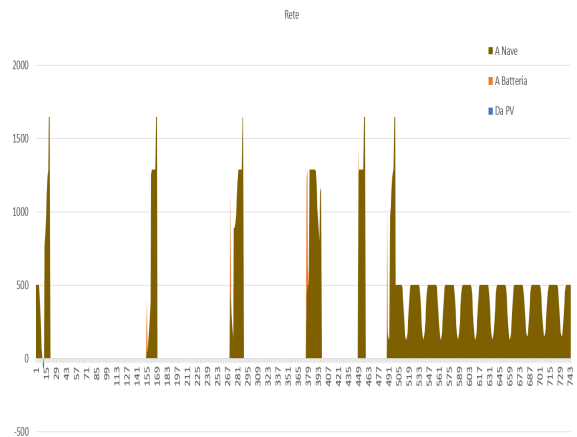
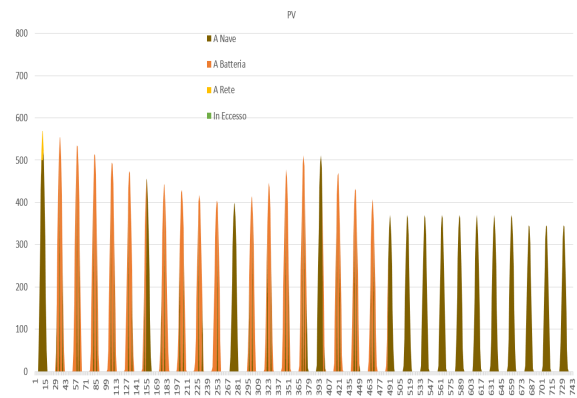
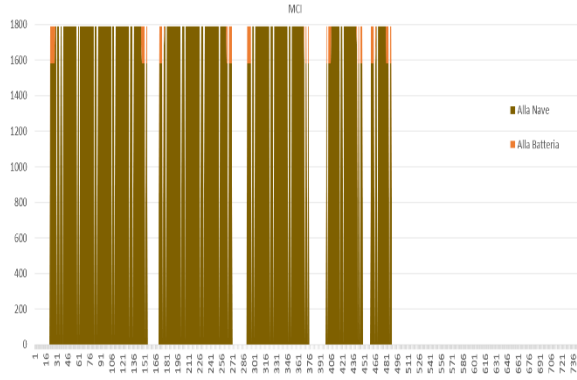
Superficie = 4.000 m²



Configurazione 3 – Ottobre [kW -ore]

Rendimento = 17%

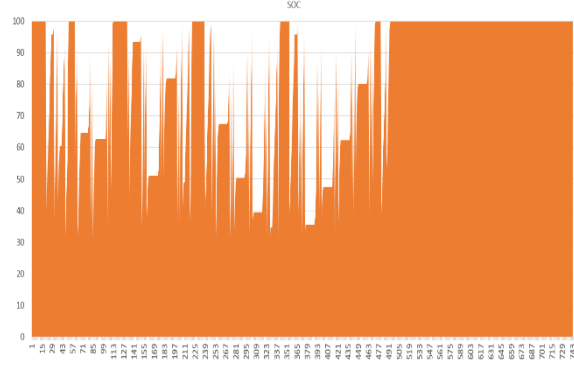
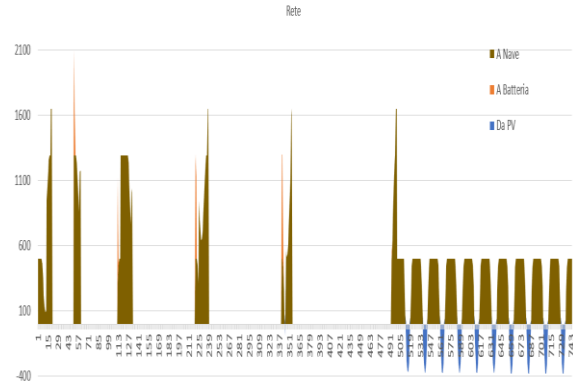
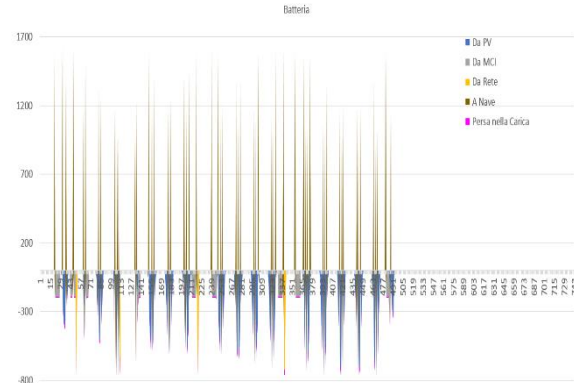
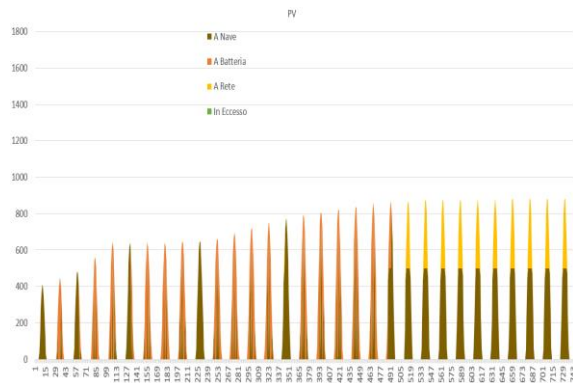
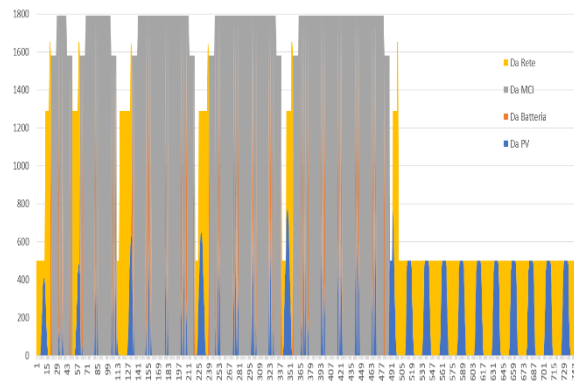
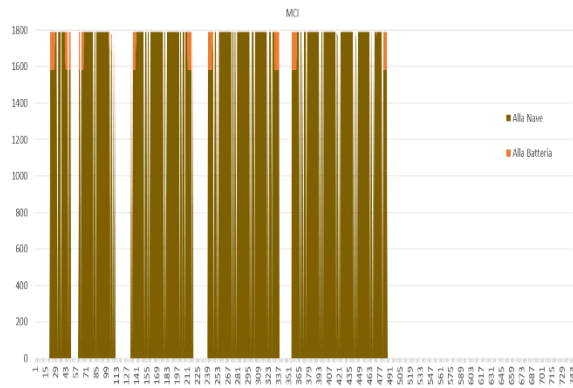
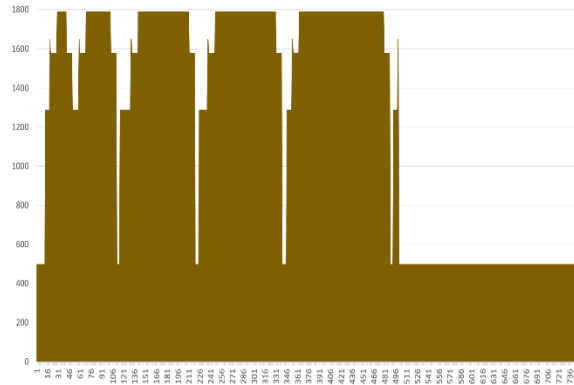
Superficie = 4.000 m²



Configurazione 3 – Gennaio [kW - ore]

Rendimento = 17%

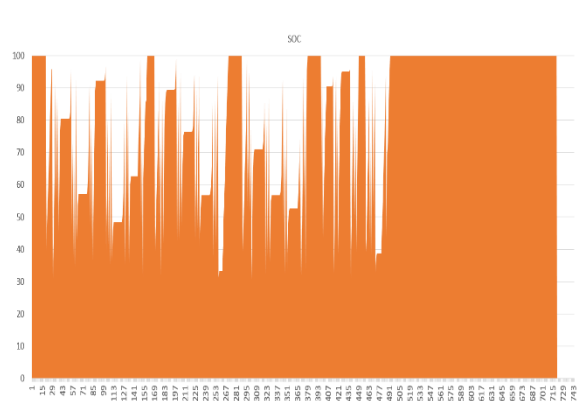
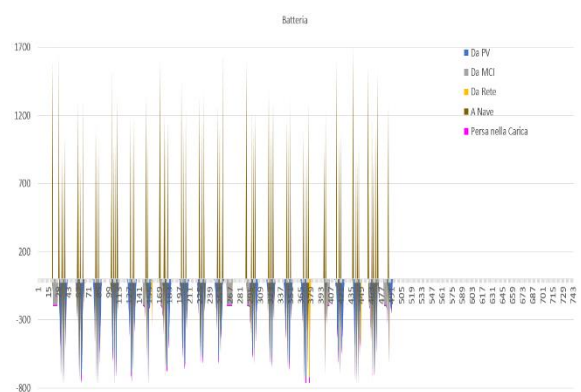
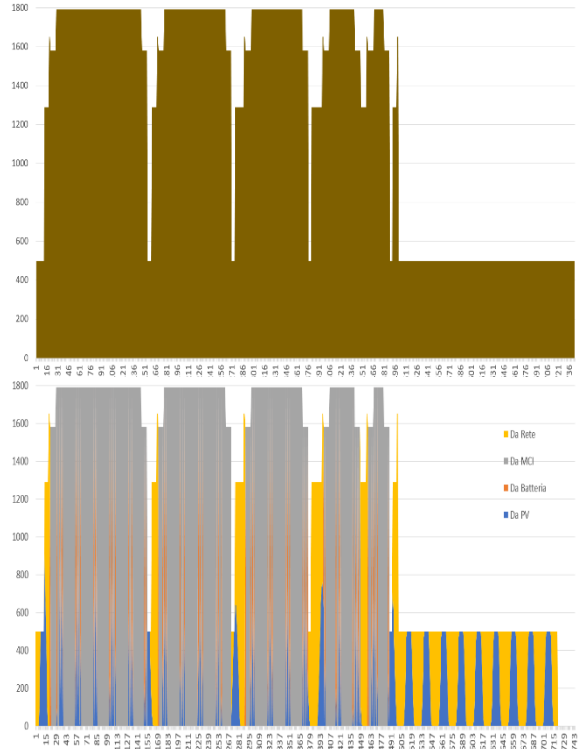
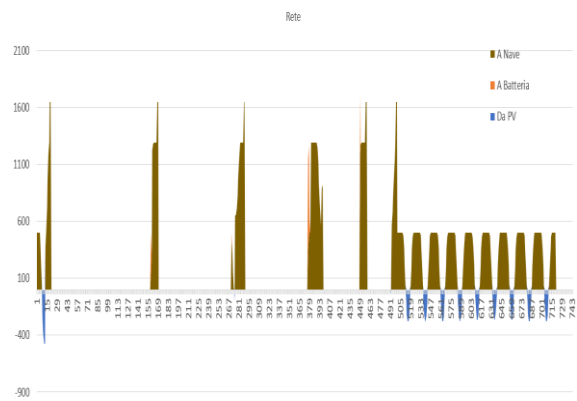
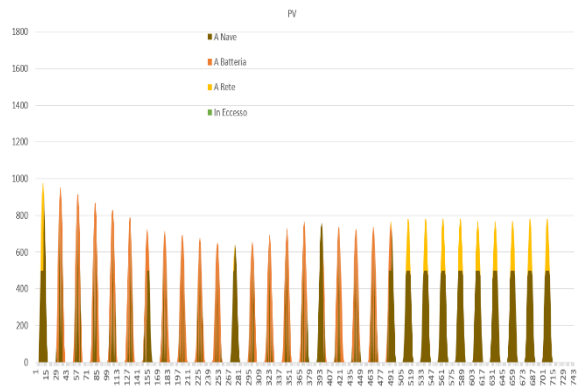
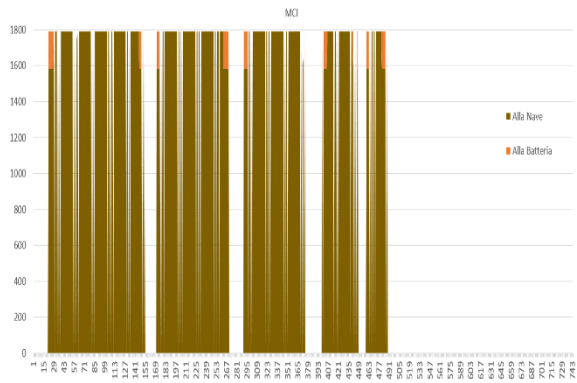
Superficie = 6.000 m²



Configurazione 3 – Aprile [kW -ore]

Rendimento = 17%

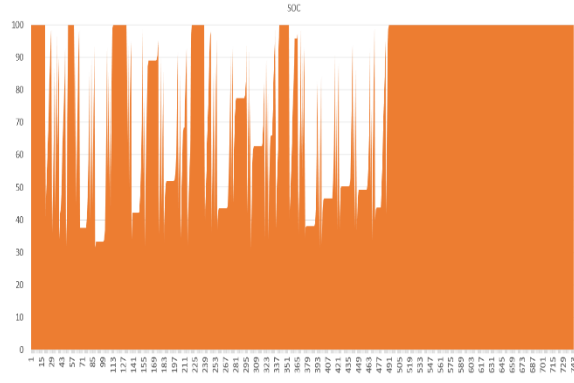
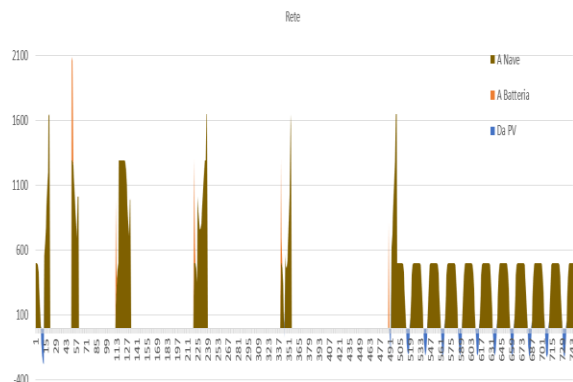
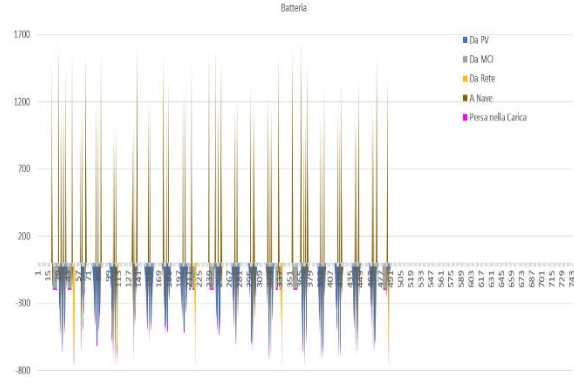
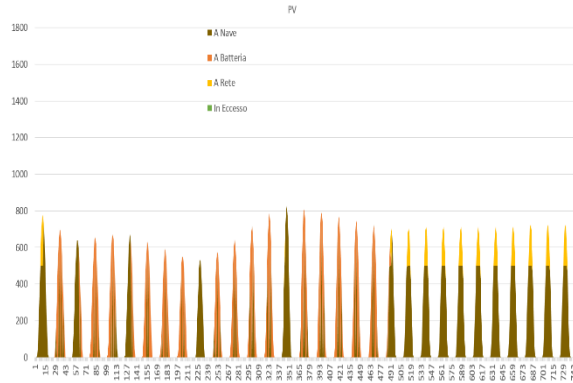
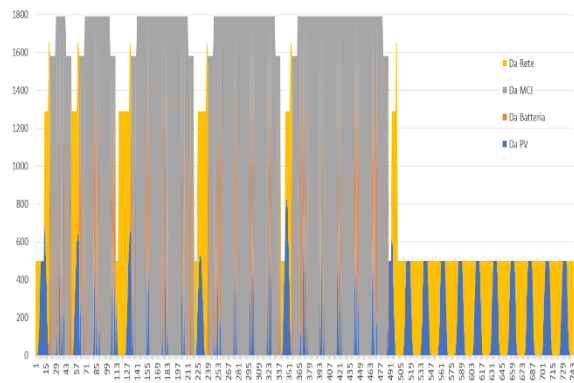
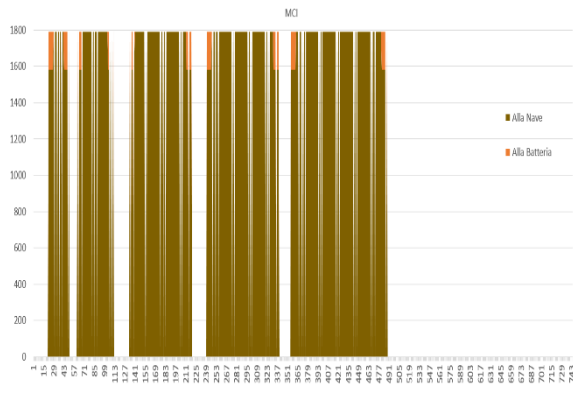
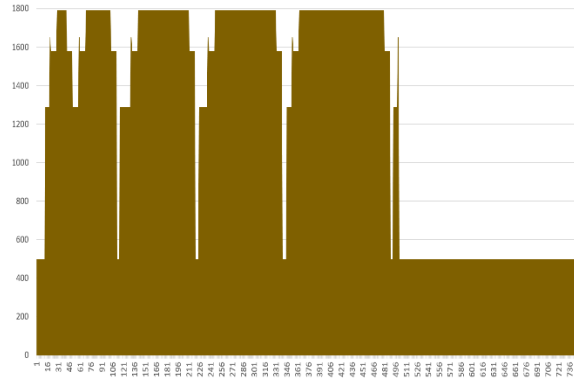
Superficie = 6.000 m²



Configurazione 3 – Luglio [kW -ore]

Rendimento = 17%

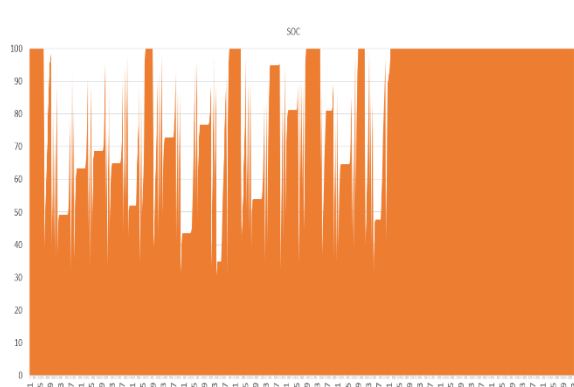
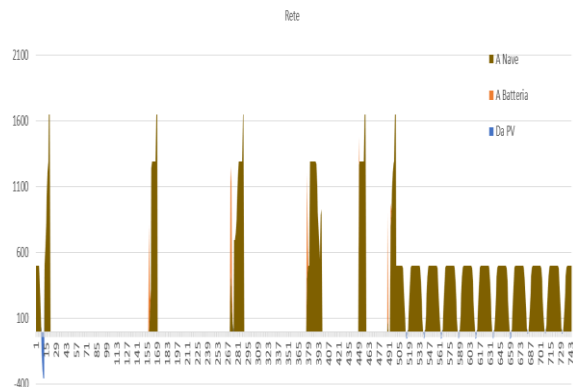
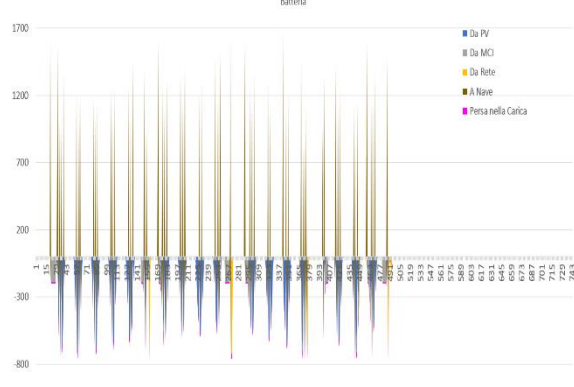
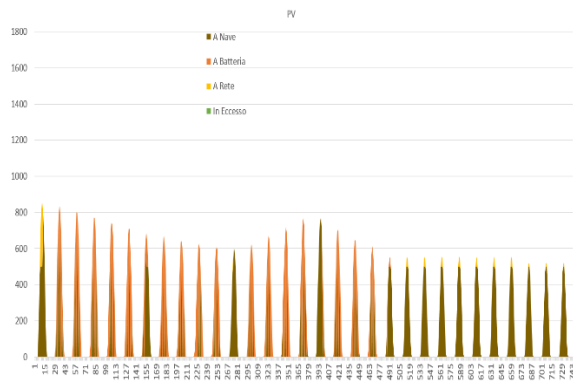
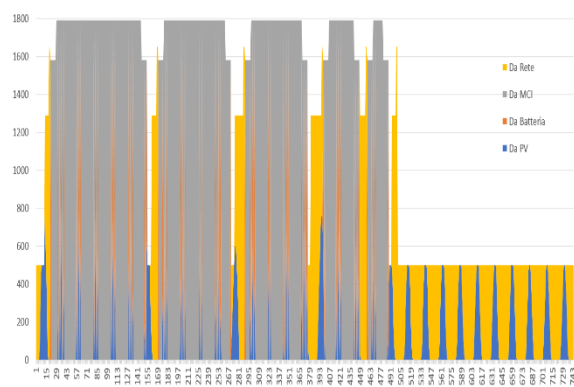
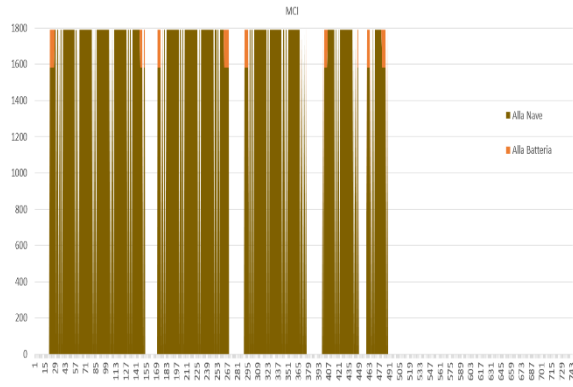
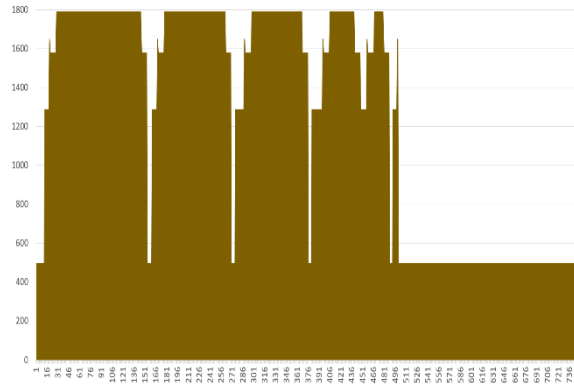
Superficie = 6.000 m²



Configurazione 3 – Ottobre [kW -ore]

Rendimento = 17%

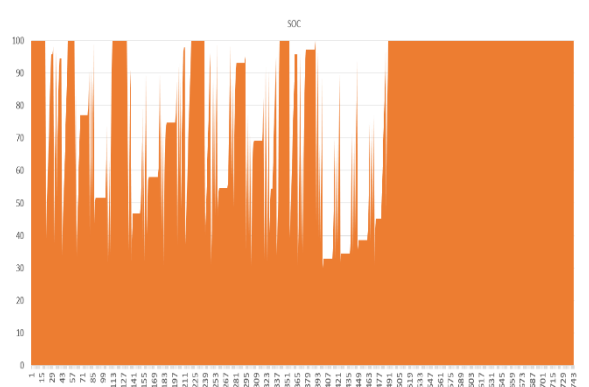
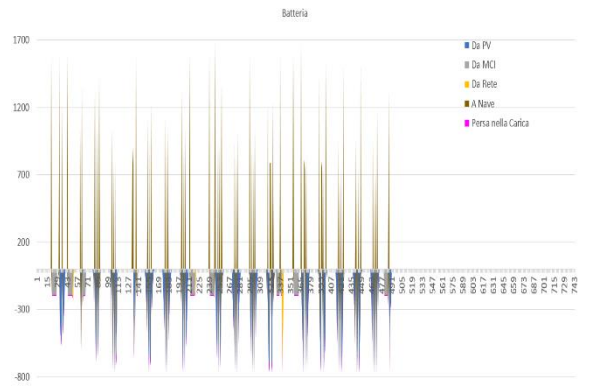
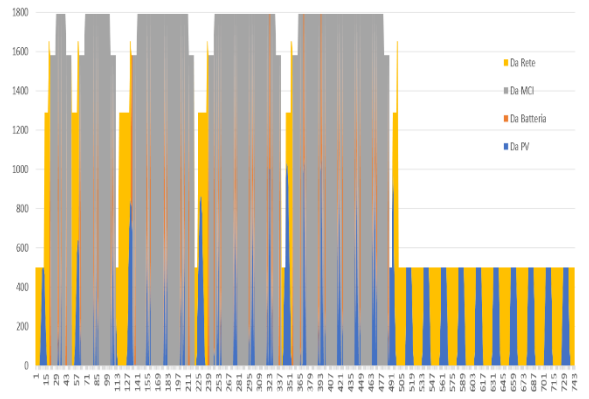
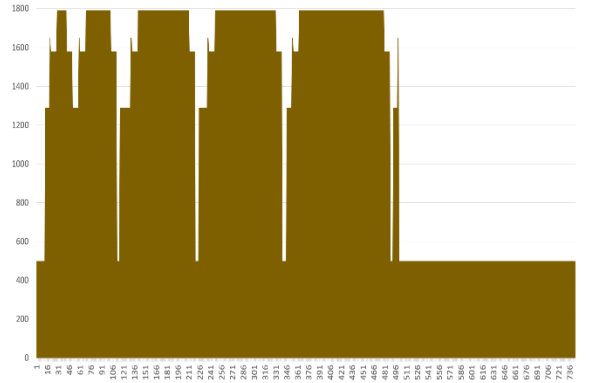
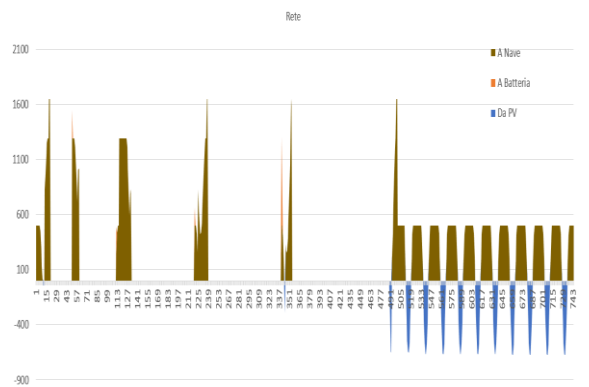
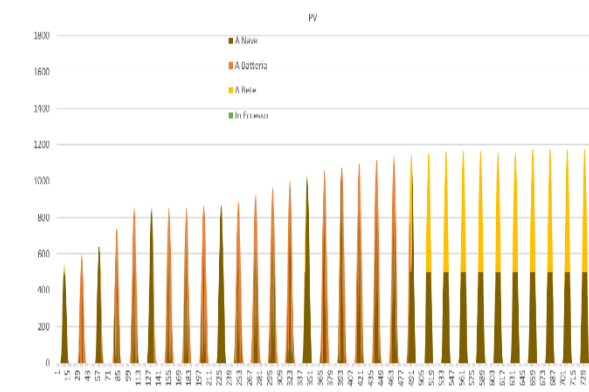
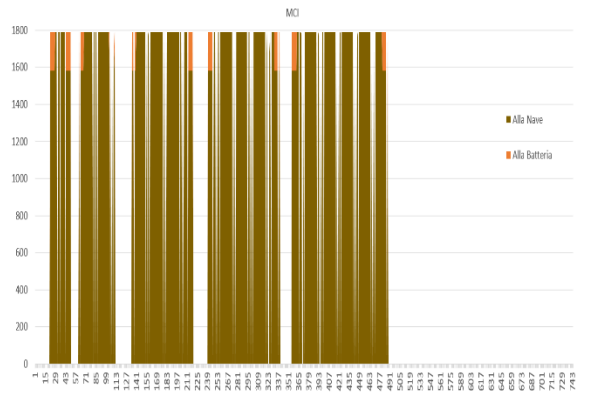
Superficie = 6.000 m²



Configurazione 3 – Gennaio [kW - ore]

Rendimento = 17%

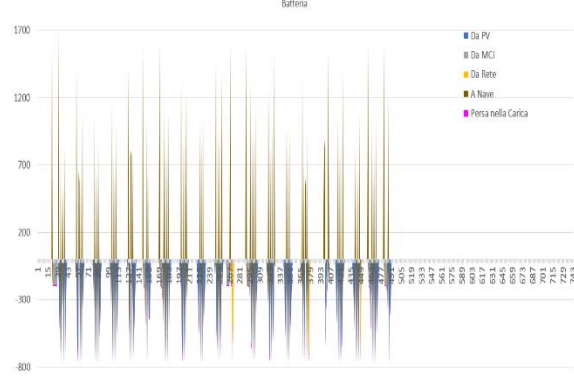
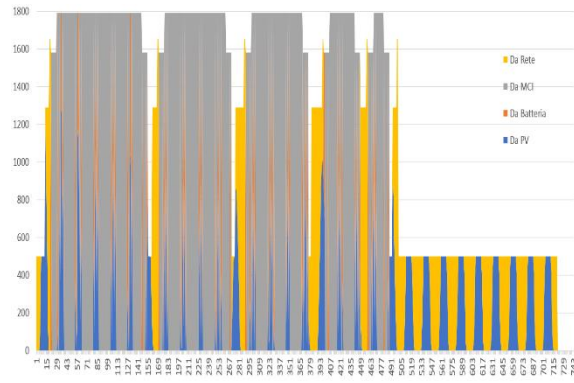
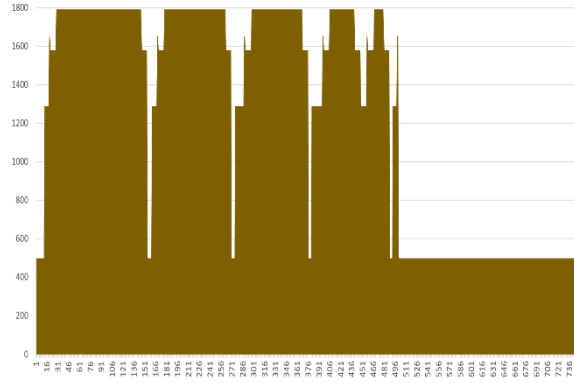
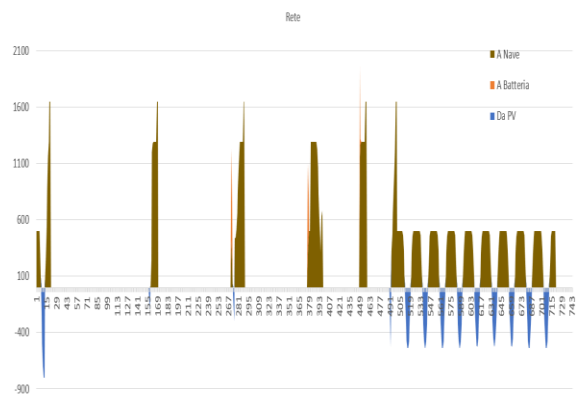
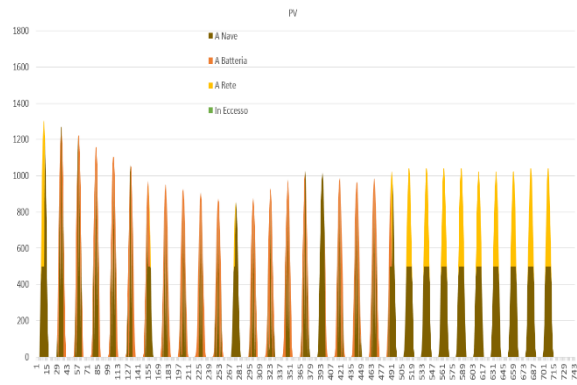
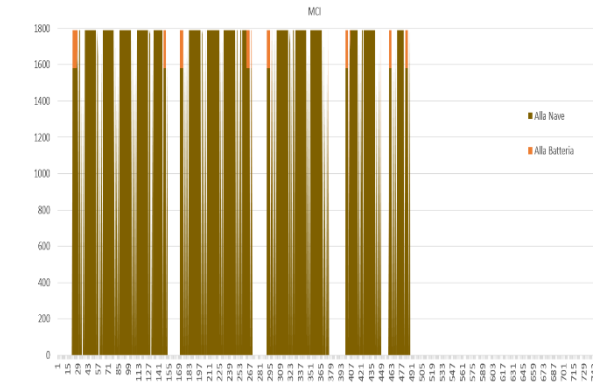
Superficie = 8.000 m²



Configurazione 3 – Aprile [kW -ore]

Rendimento = 17%

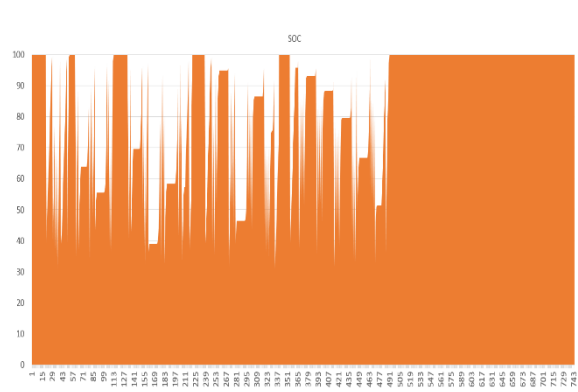
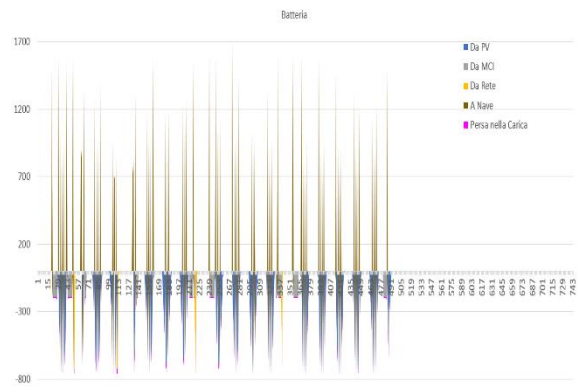
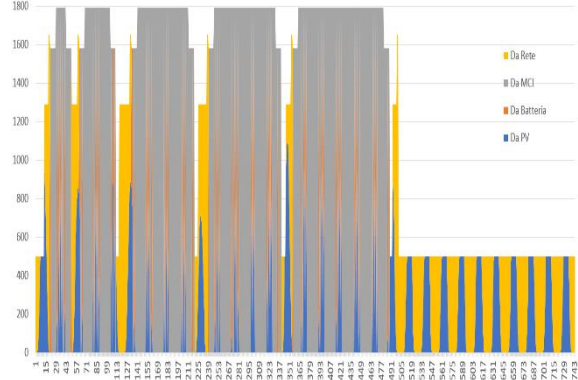
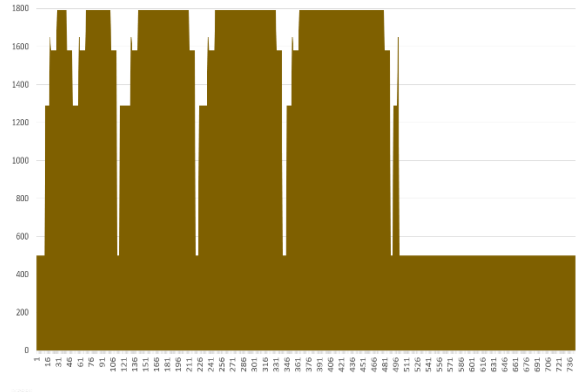
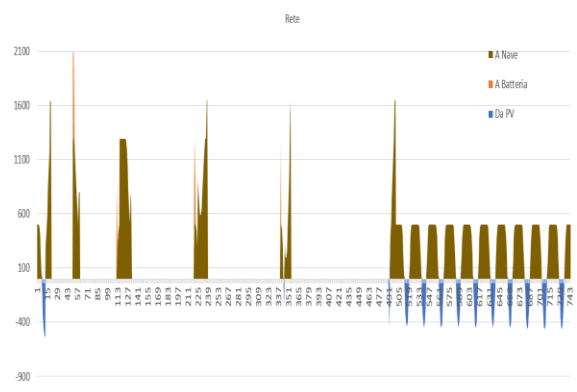
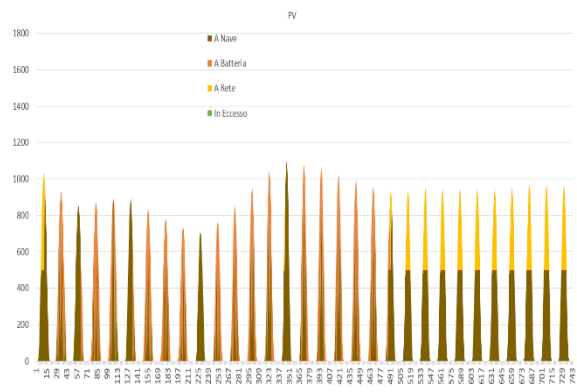
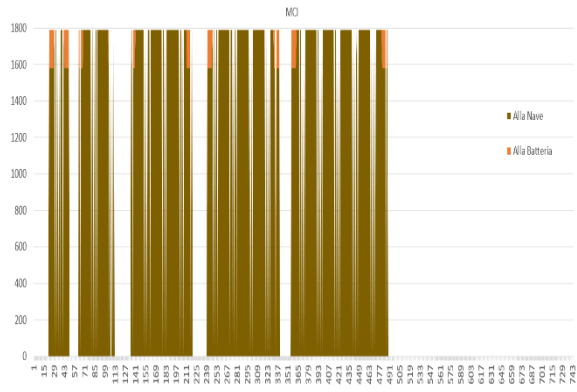
Superficie = 8.000 m²



Configurazione 3 – Luglio [kW -ore]

Rendimento = 17%

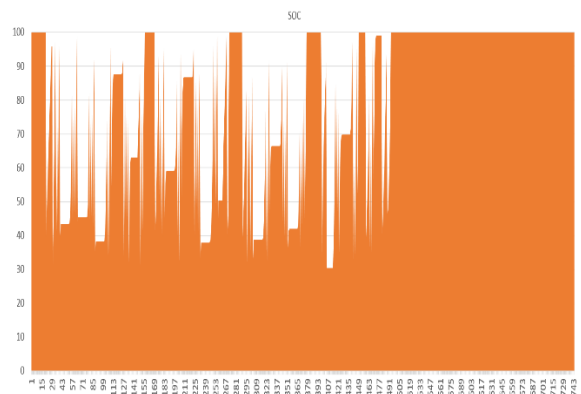
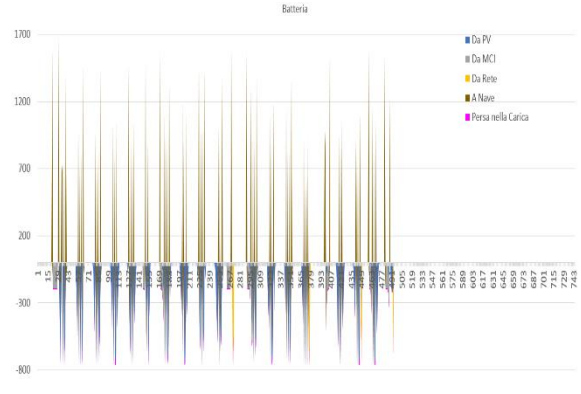
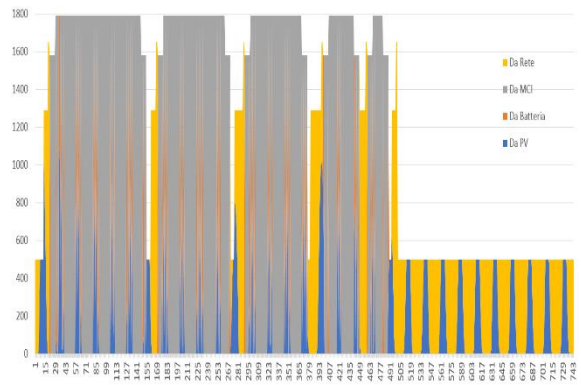
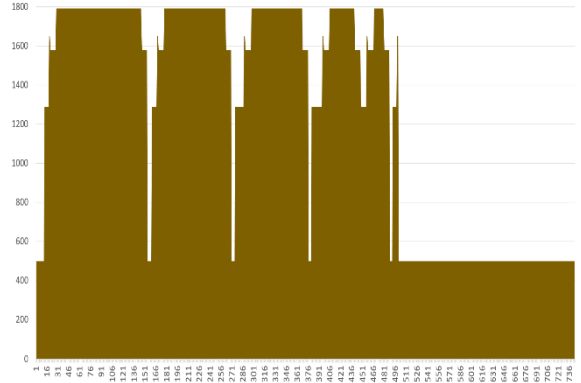
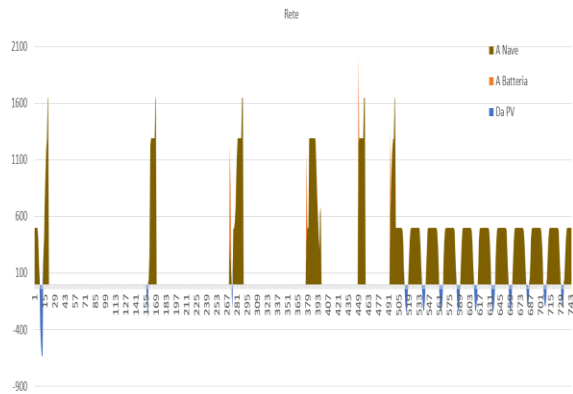
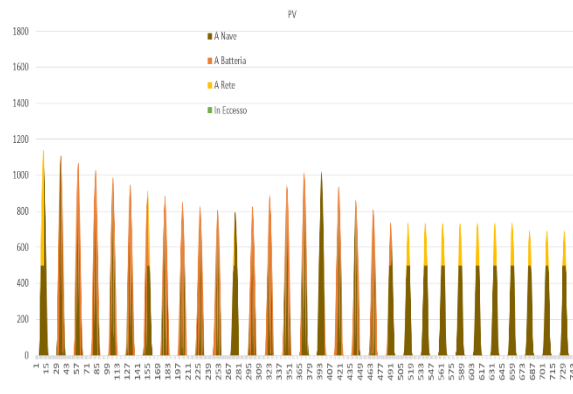
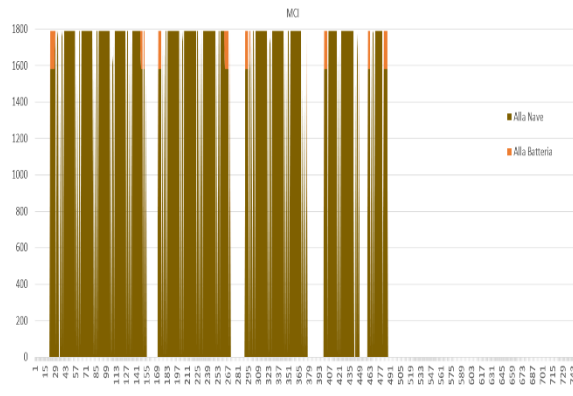
Superficie = 8.000 m²



Configurazione 3 – Ottobre [kW -ore]

Rendimento = 17%

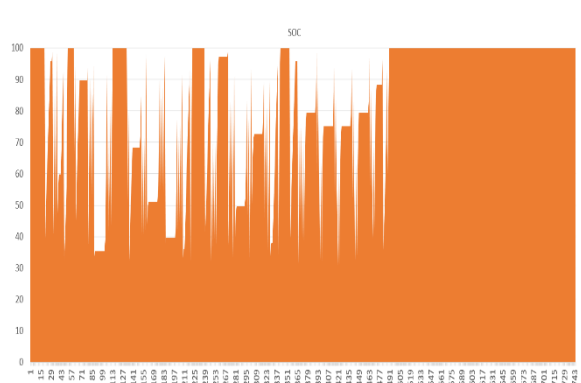
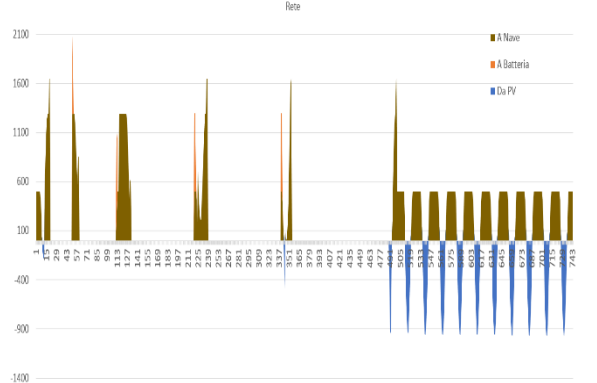
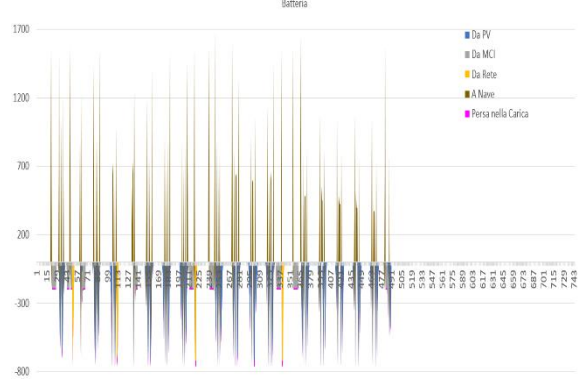
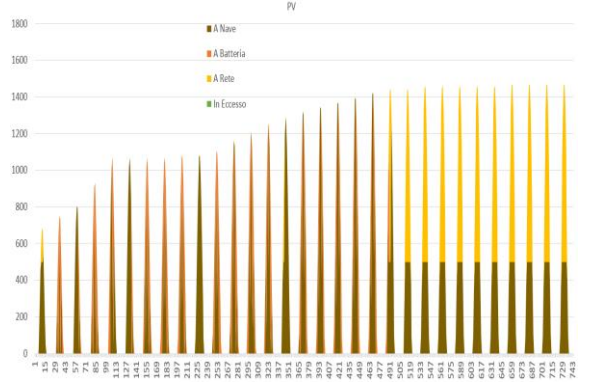
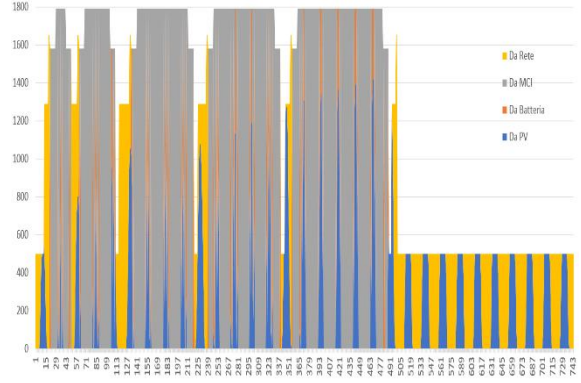
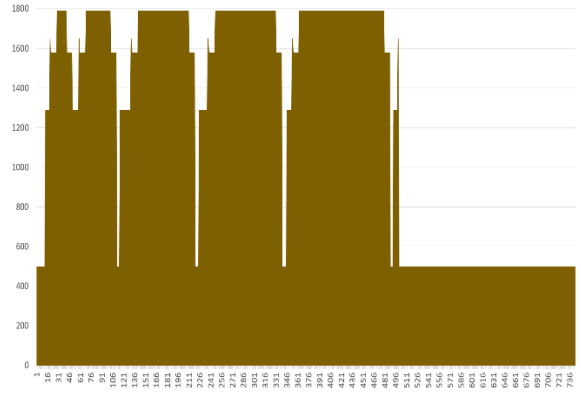
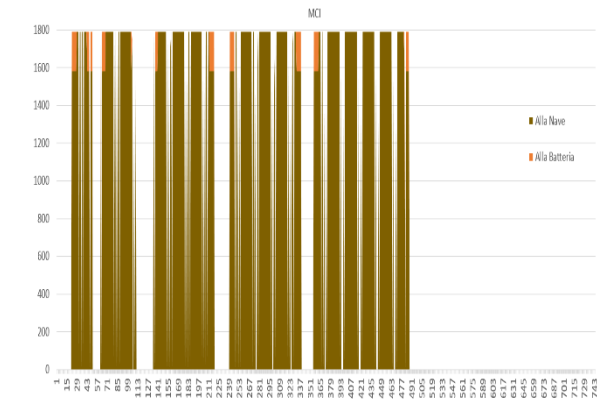
Superficie = 8.000 m²



Configurazione 3 – Gennaio [kW - ore]

Rendimento = 17%

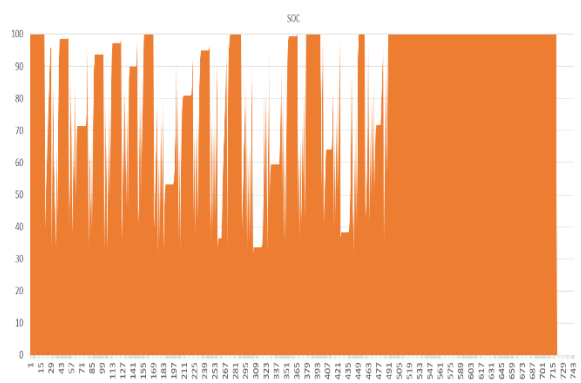
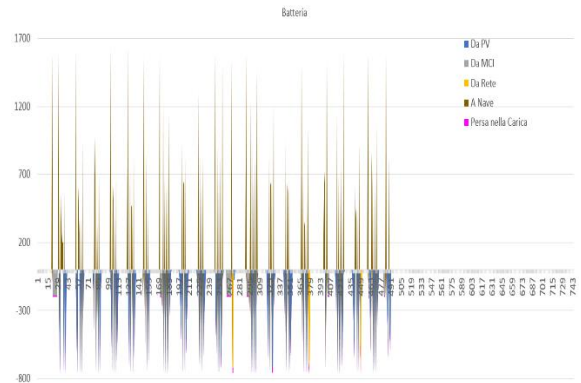
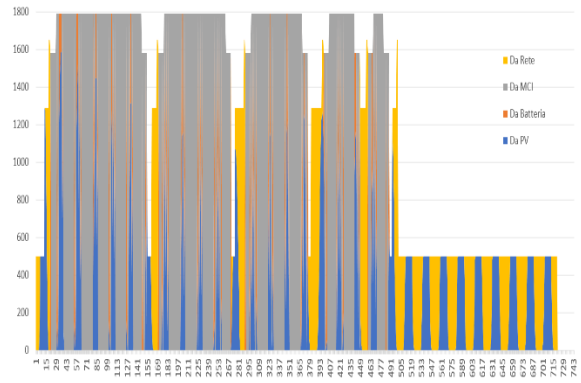
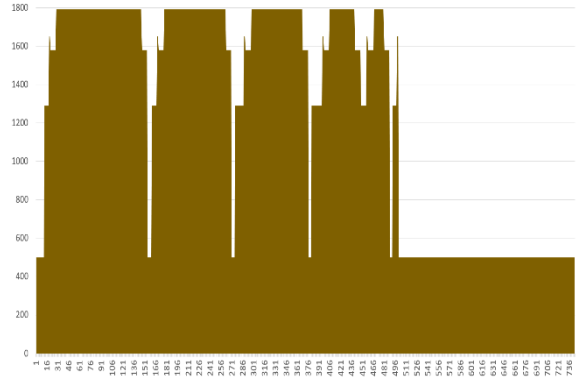
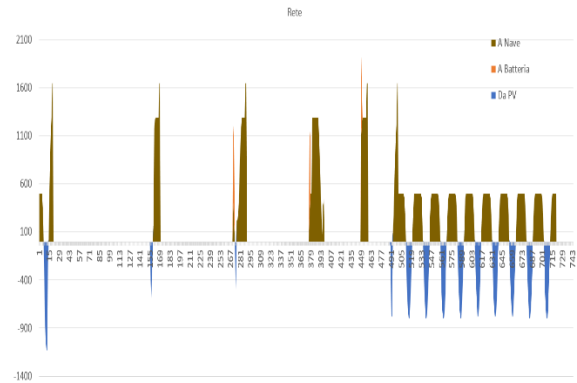
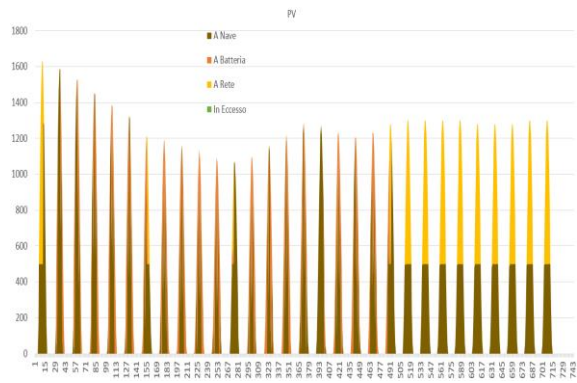
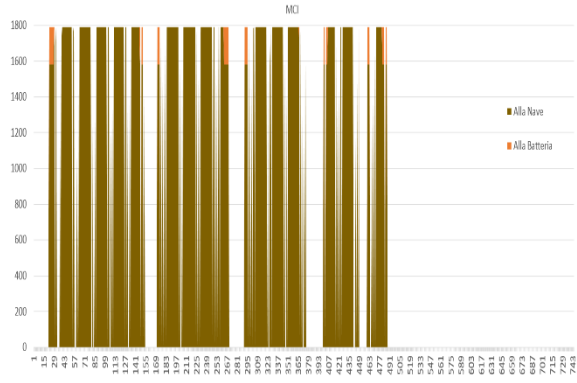
Superficie = 10.000 m²



Configurazione 3 – Aprile [kW -ore]

Rendimento = 17%

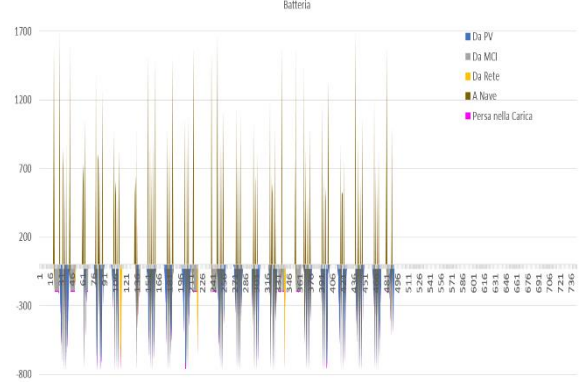
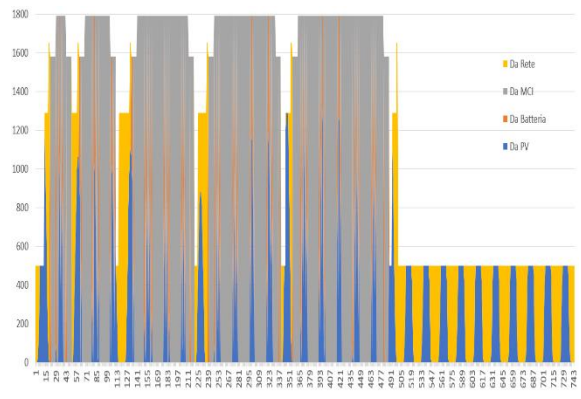
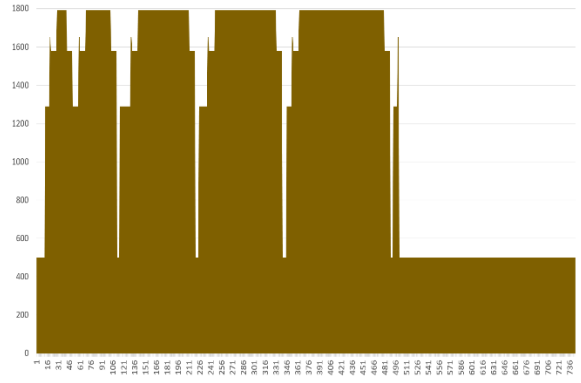
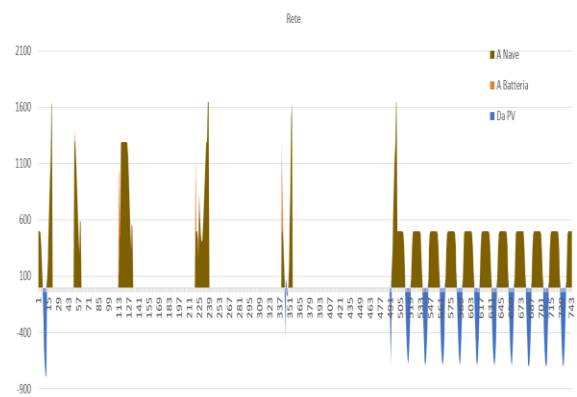
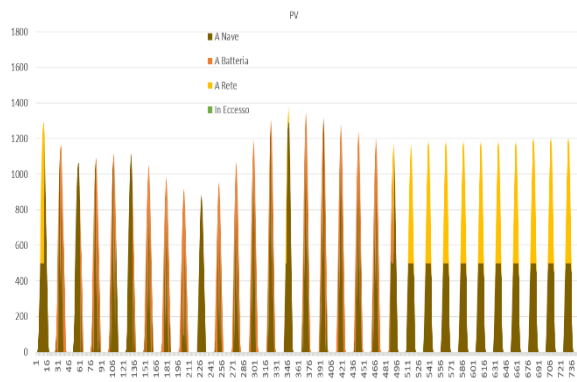
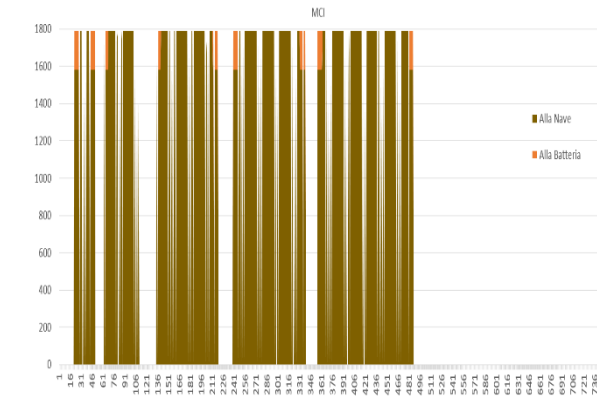
Superficie = 10.000 m²



Configurazione 3 – Luglio [kW -ore]

Rendimento = 17%

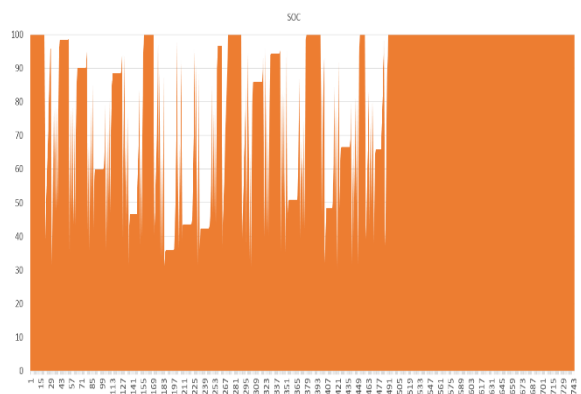
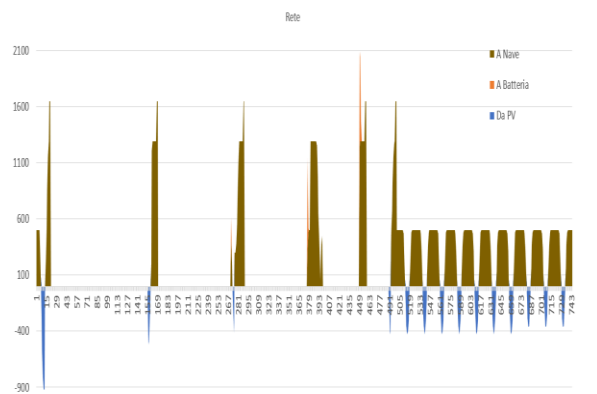
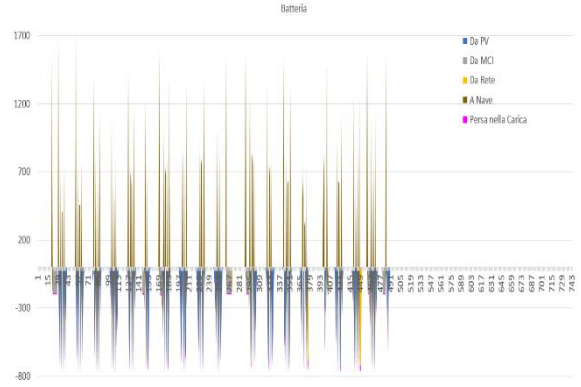
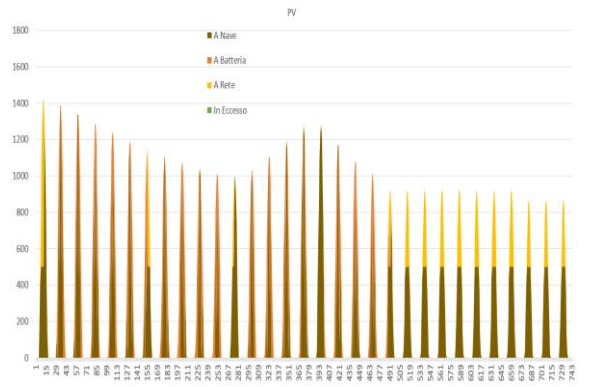
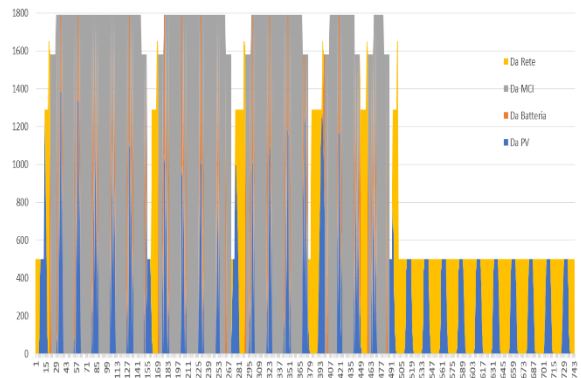
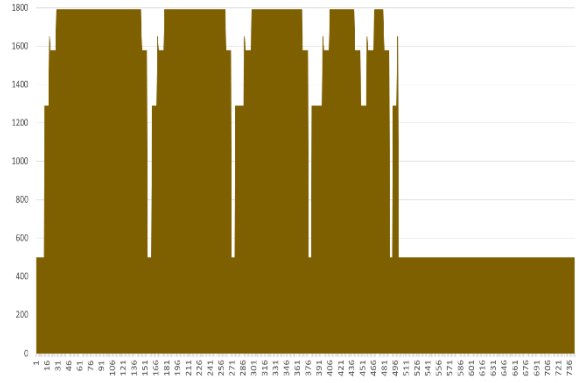
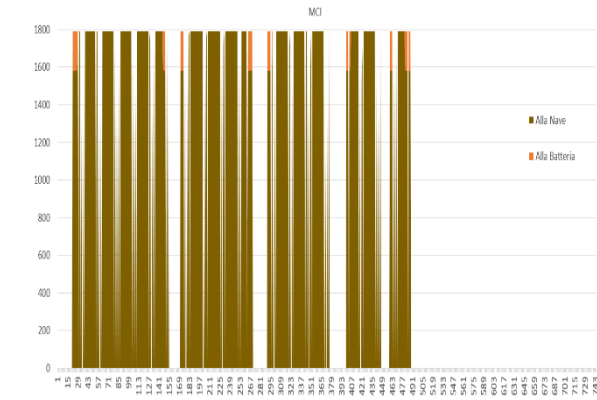
Superficie = 10.000 m²



Configurazione 3 – Ottobre [kW -ore]

Rendimento = 17%

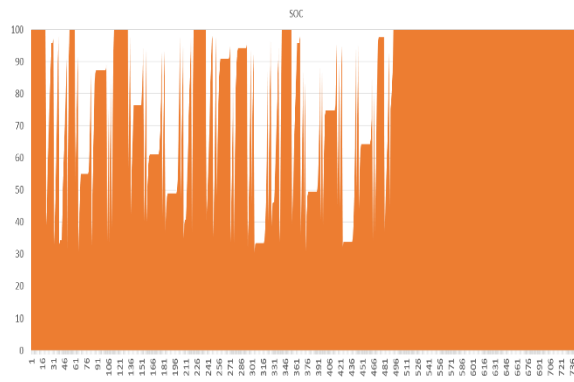
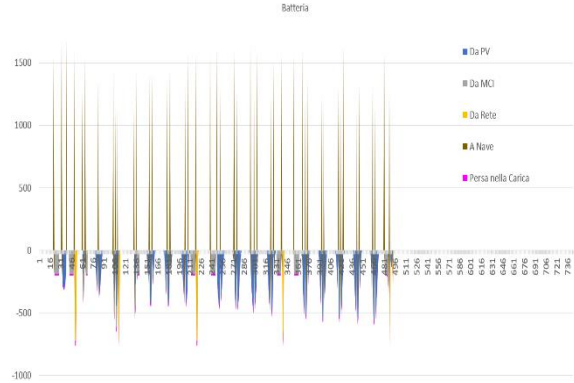
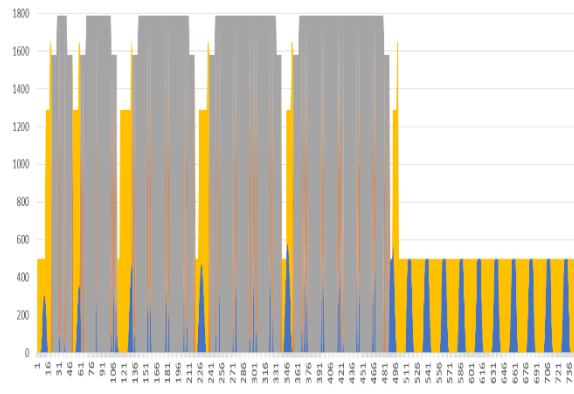
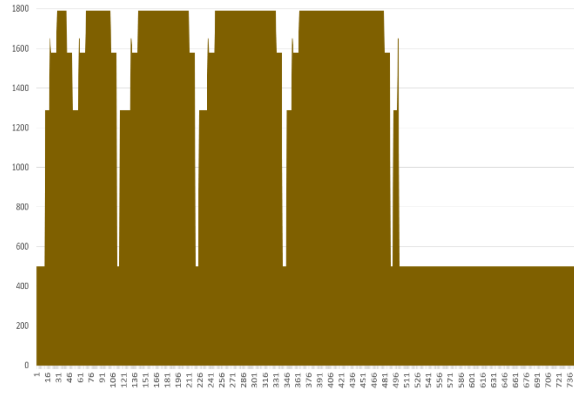
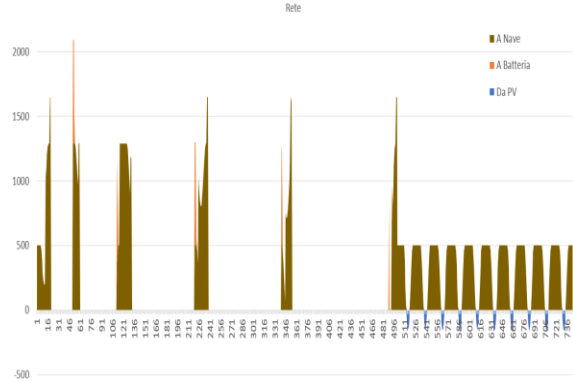
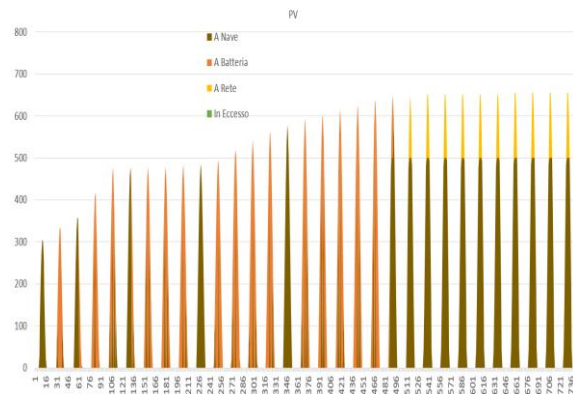
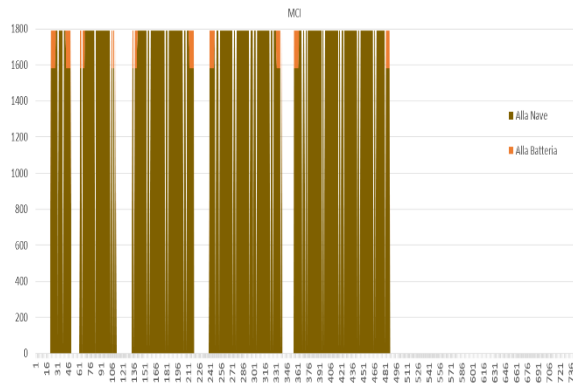
Superficie = 10.000 m²



Configurazione 3 – Gennaio [kW - ore]

Rendimento = 19%

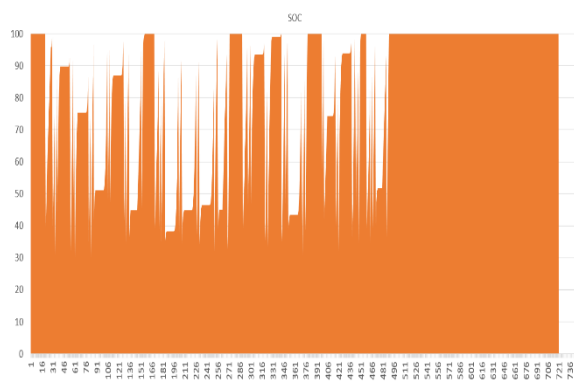
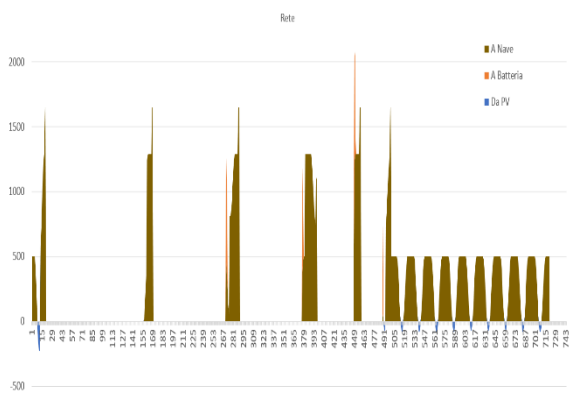
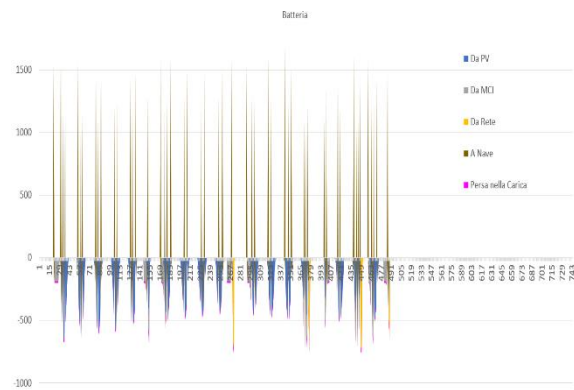
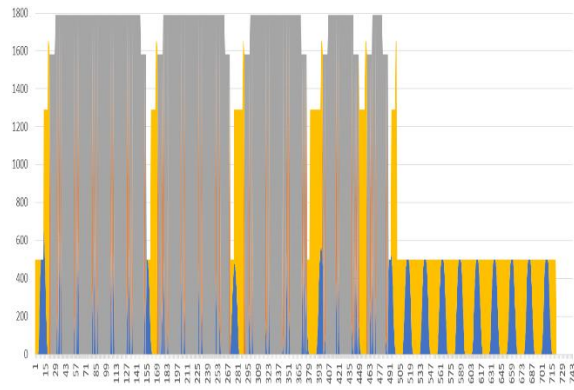
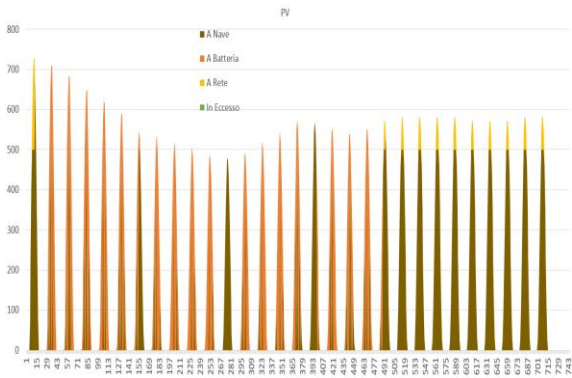
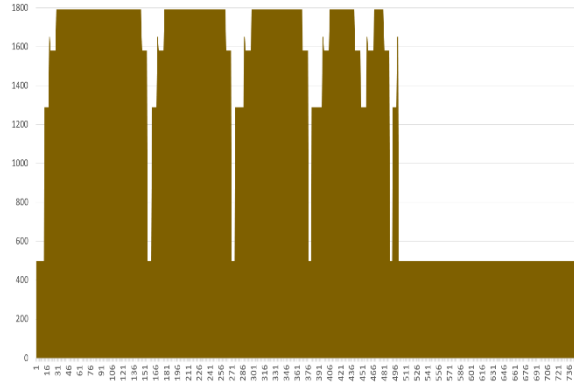
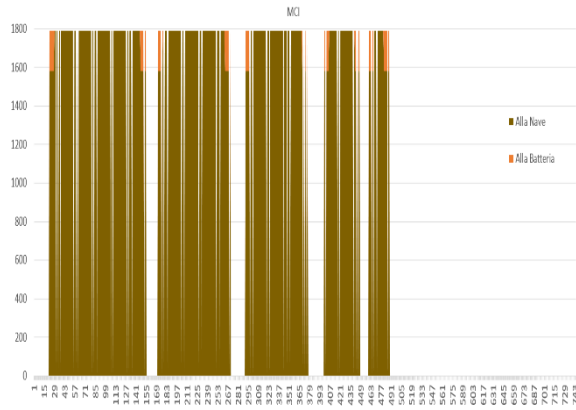
Superficie = 4.000 m²



Configurazione 3 – Aprile [kW -ore]

Rendimento = 19%

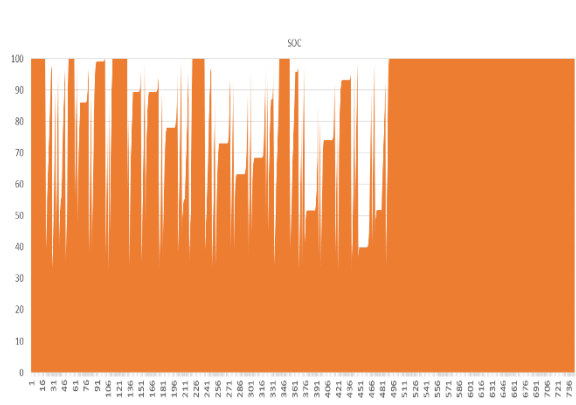
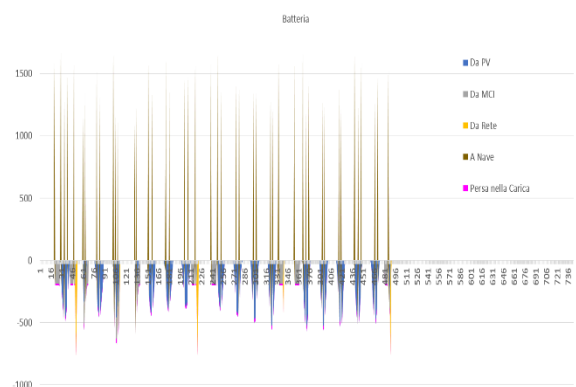
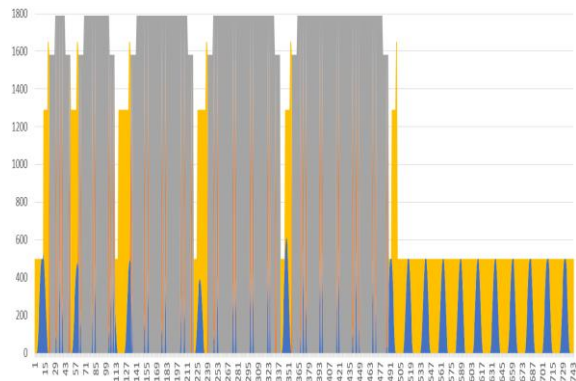
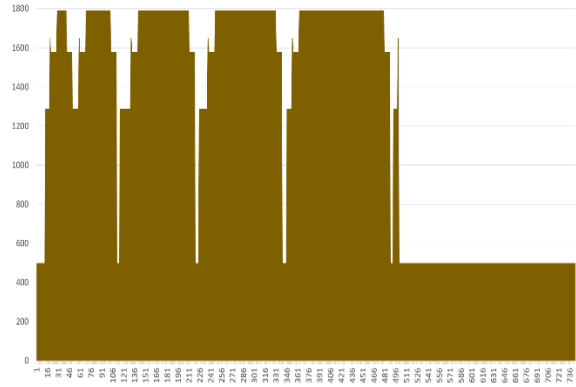
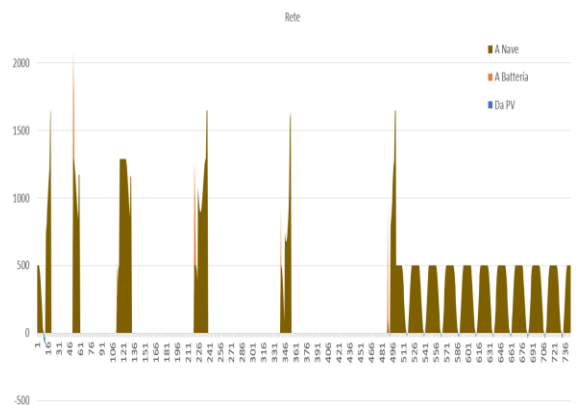
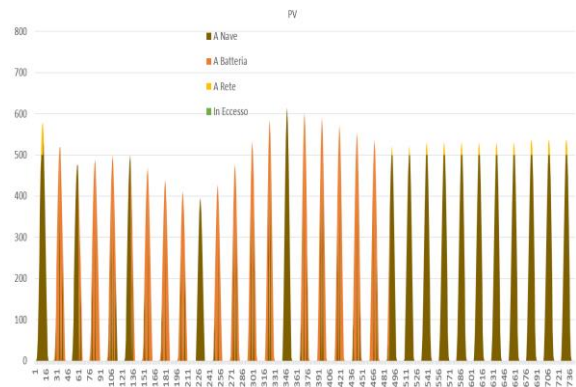
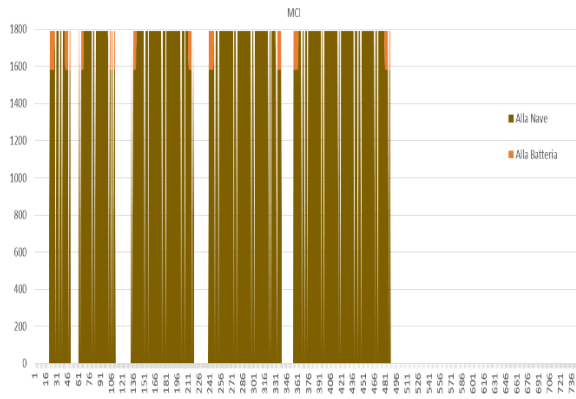
Superficie = 4.000 m²



Configurazione 3 – Luglio [kW -ore]

Rendimento = 19%

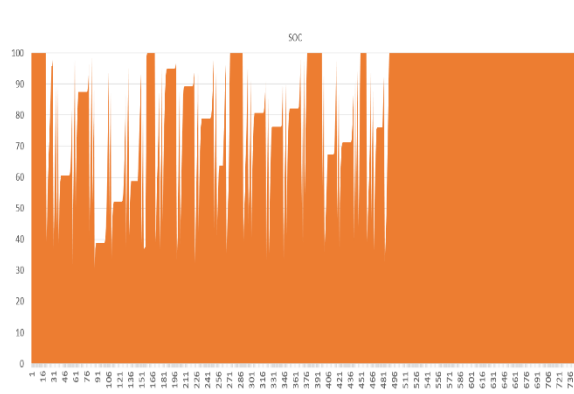
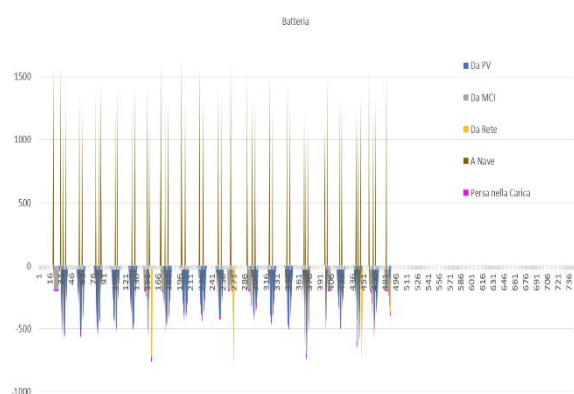
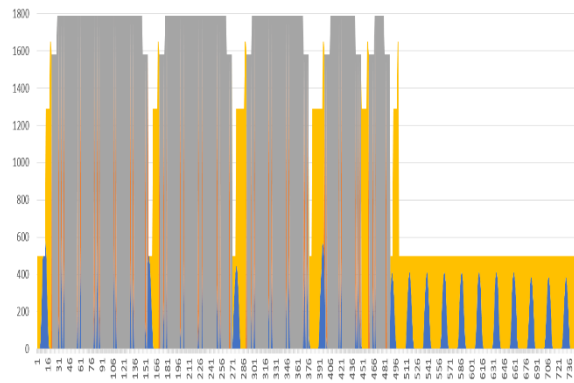
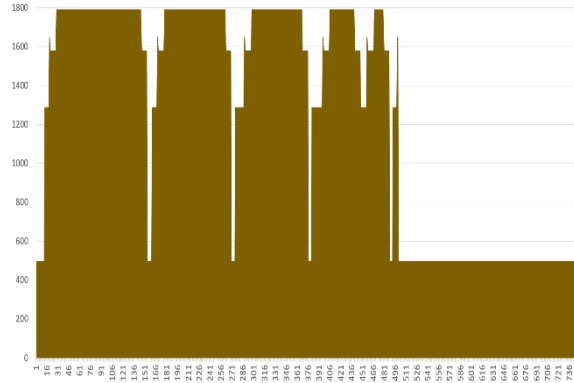
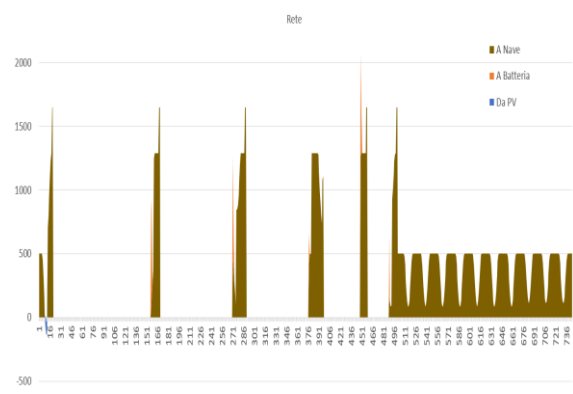
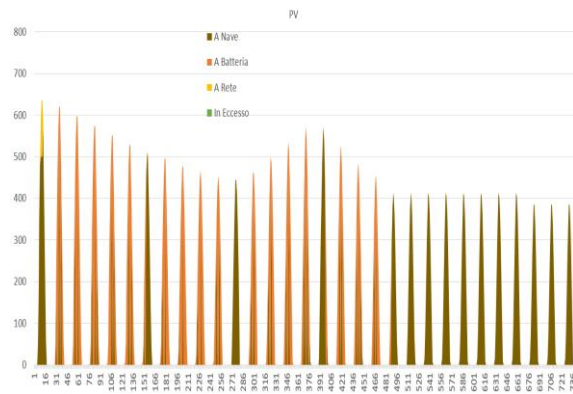
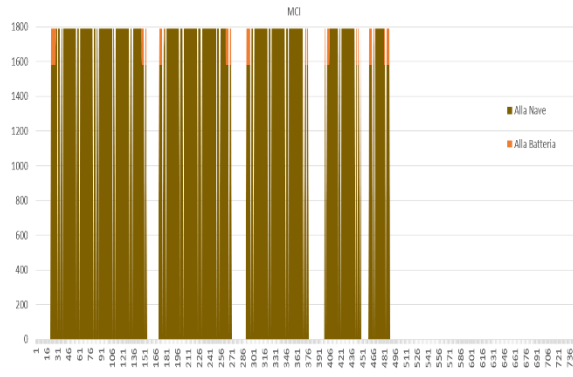
Superficie = 4.000 m²



Configurazione 3 – Ottobre [kW -ore]

Rendimento = 19%

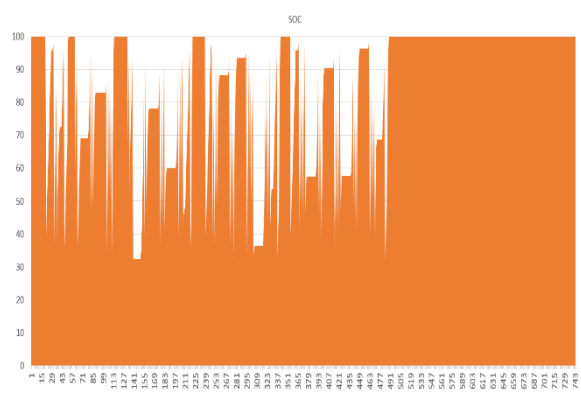
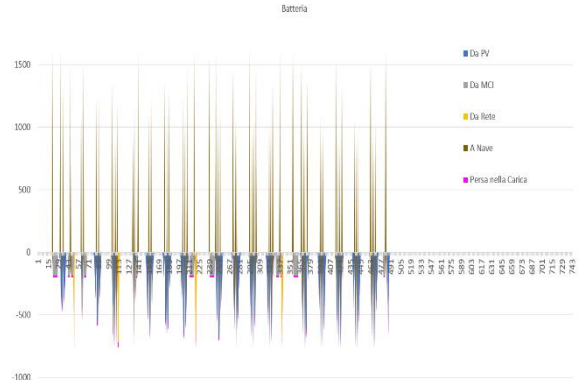
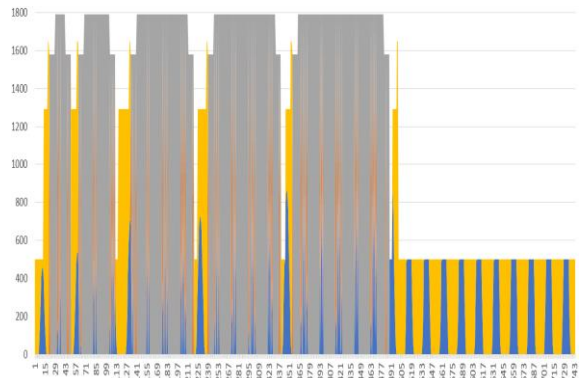
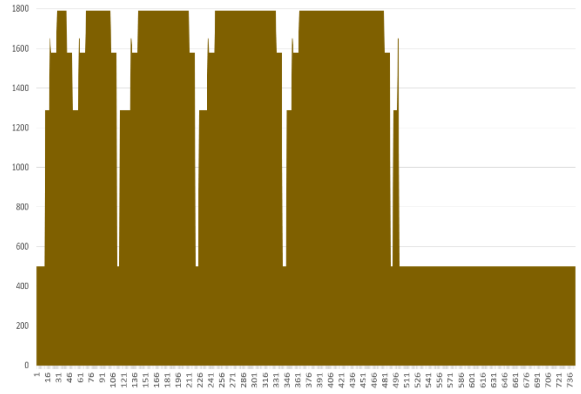
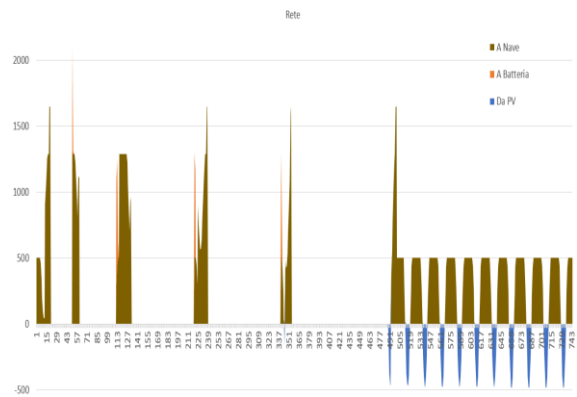
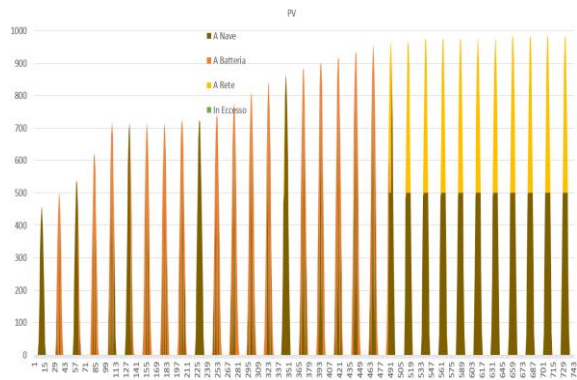
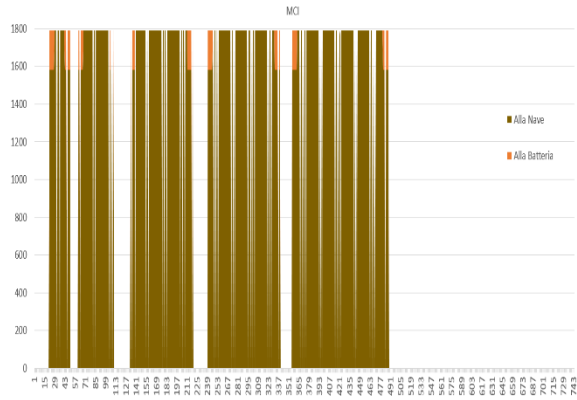
Superficie = 4.000 m²



Configurazione 3 – Gennaio [kW - ore]

Rendimento = 19%

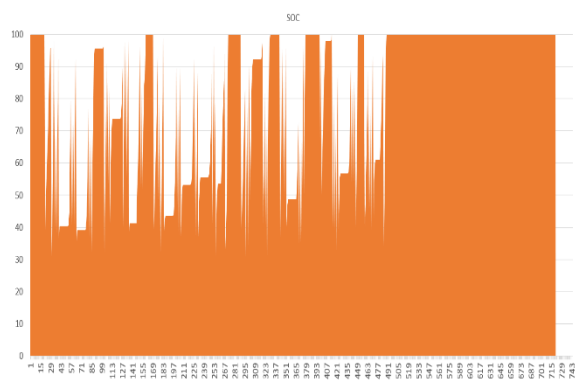
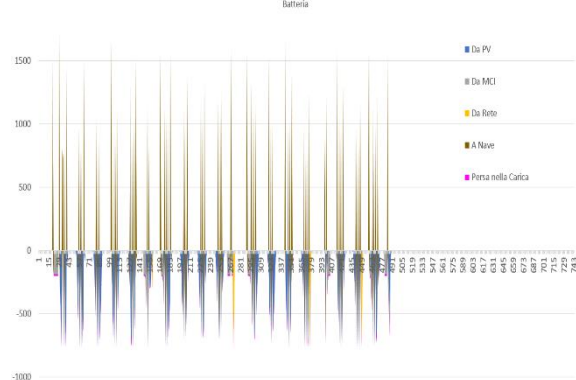
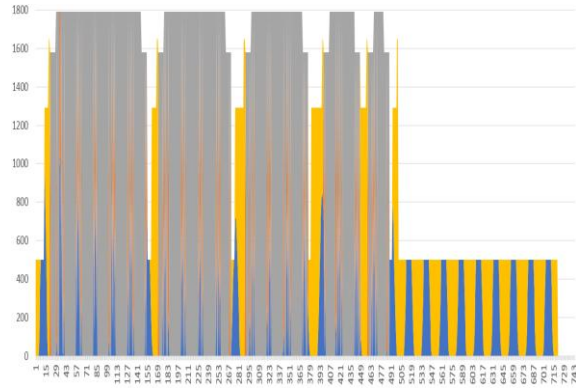
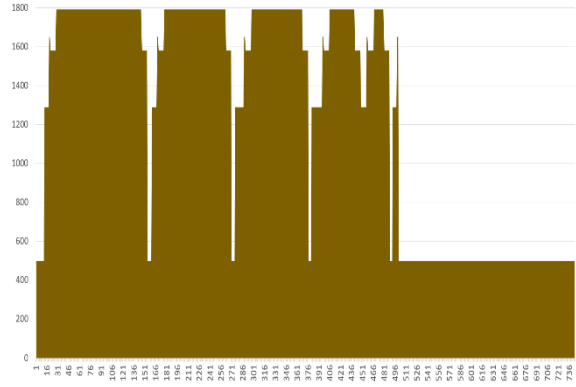
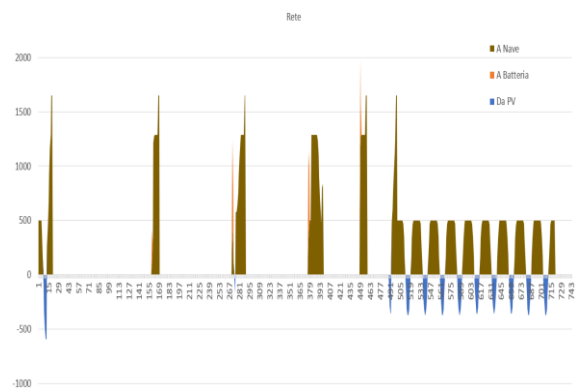
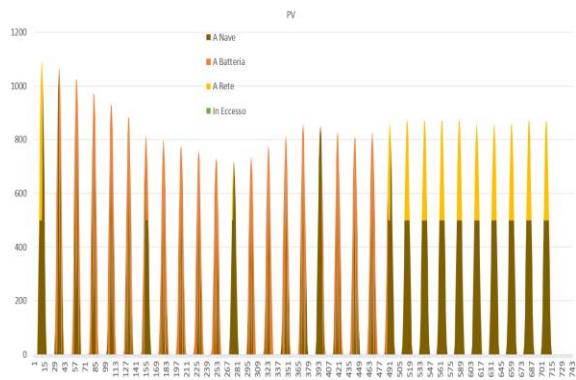
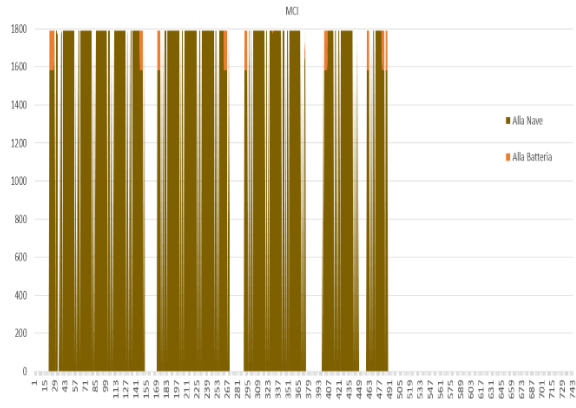
Superficie = 6.000 m²



Configurazione 3 – Aprile [kW -ore]

Rendimento = 19%

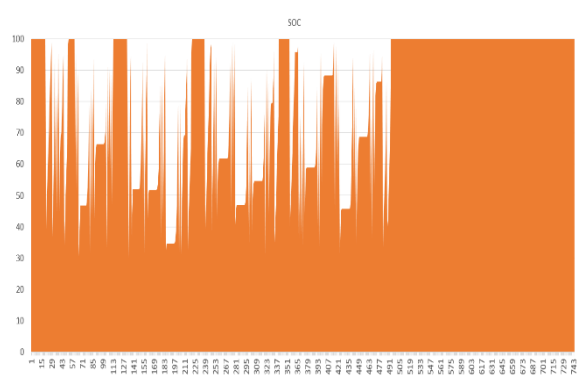
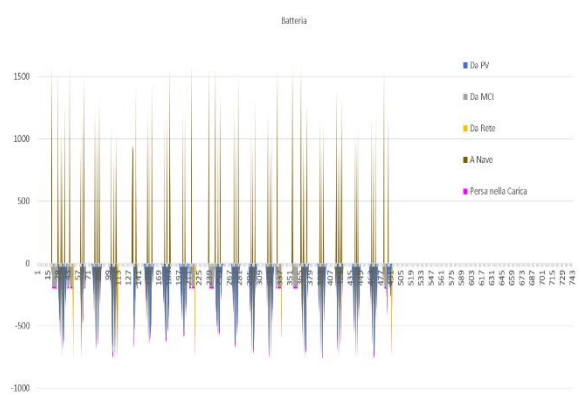
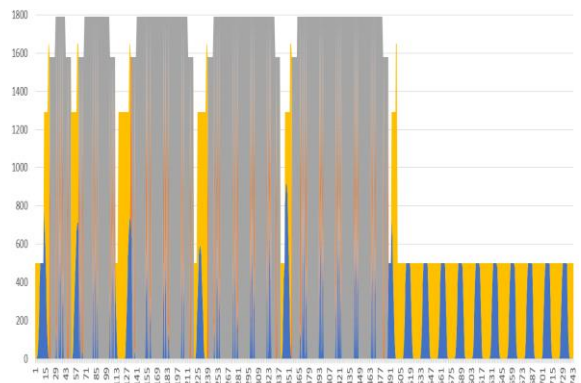
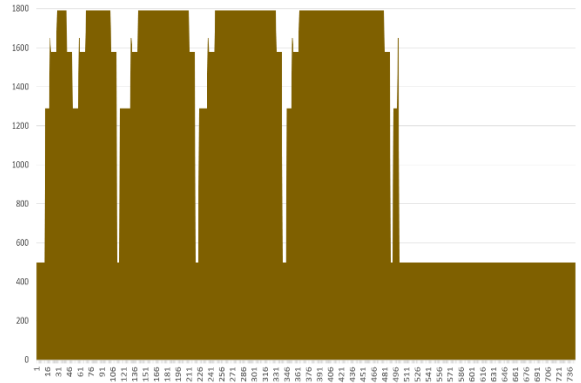
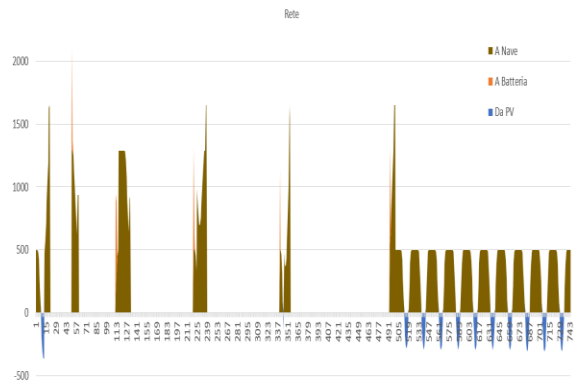
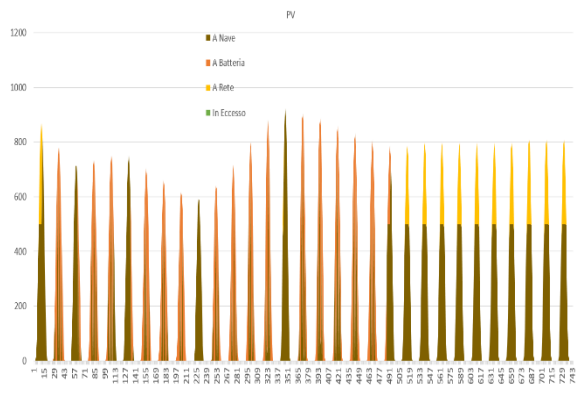
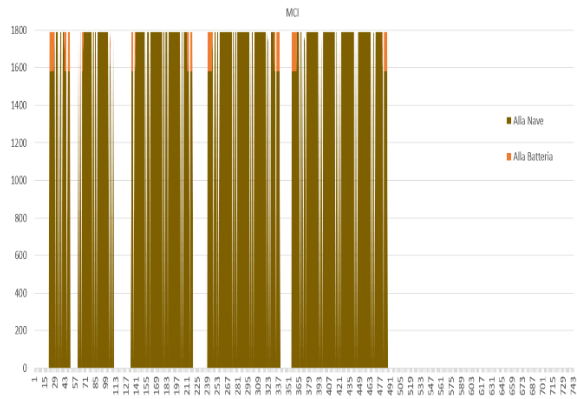
Superficie = 6.000 m²



Configurazione 3 – Luglio [kW -ore]

Rendimento = 19%

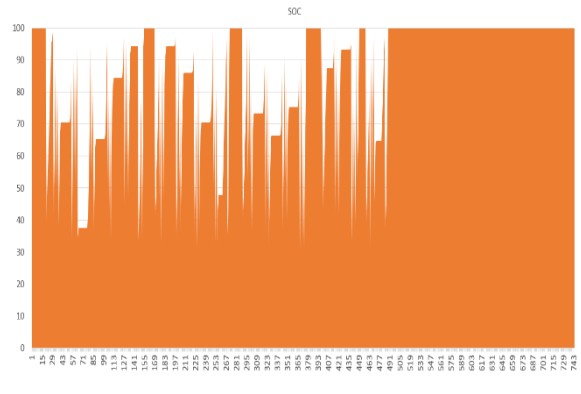
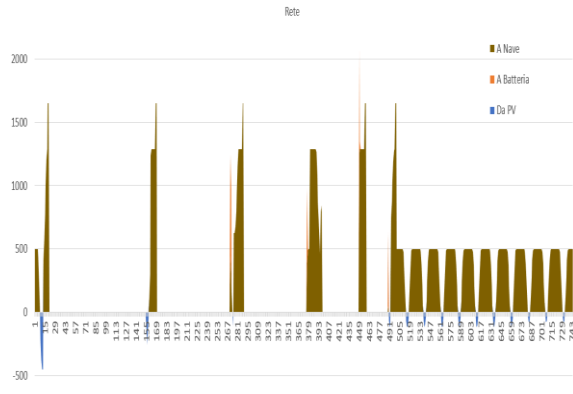
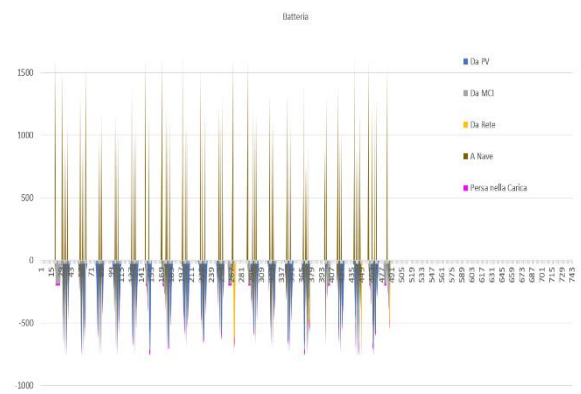
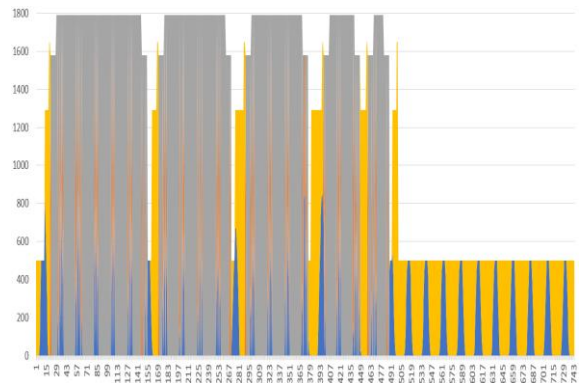
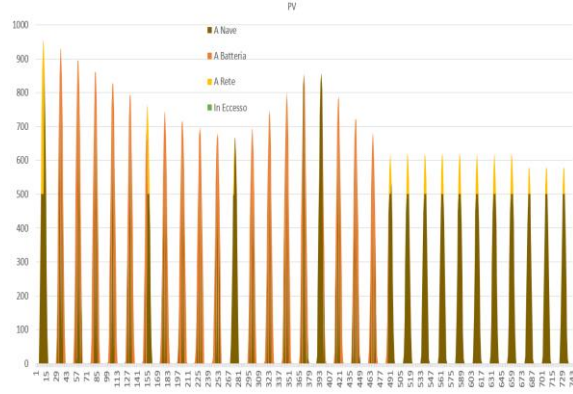
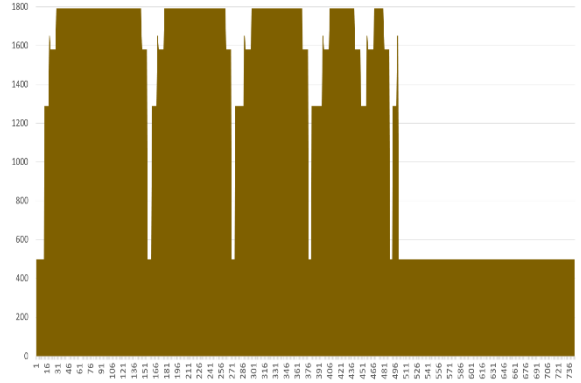
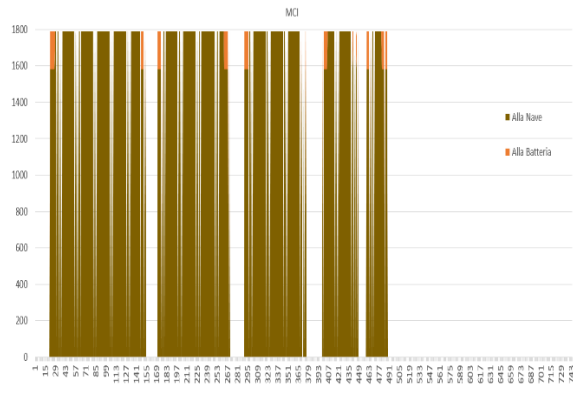
Superficie = 6.000 m²



Configurazione 3 – Ottobre [kW -ore]

Rendimento = 19%

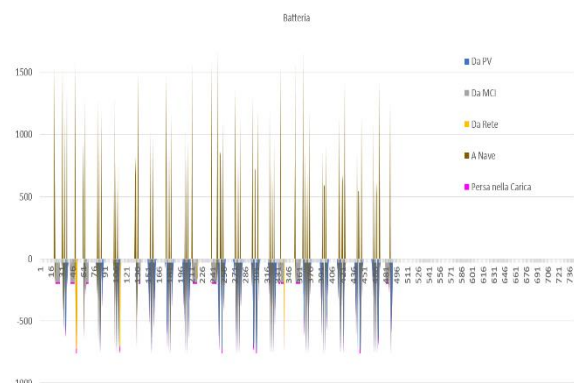
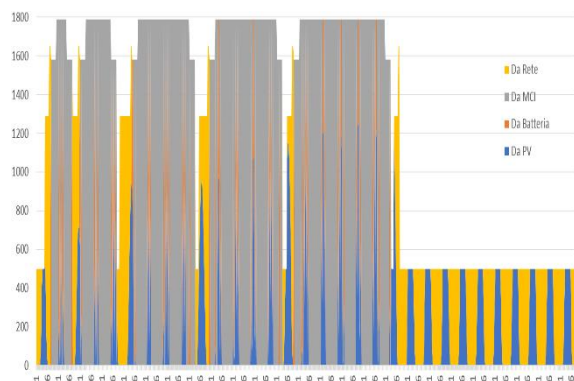
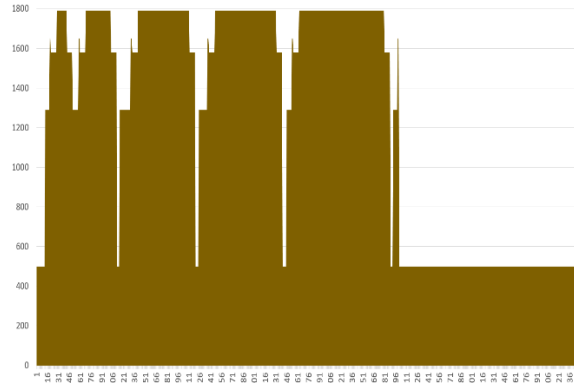
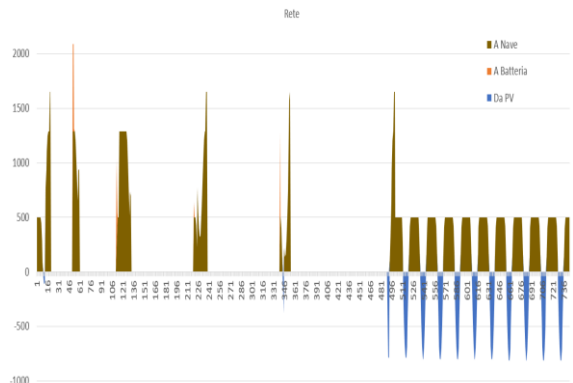
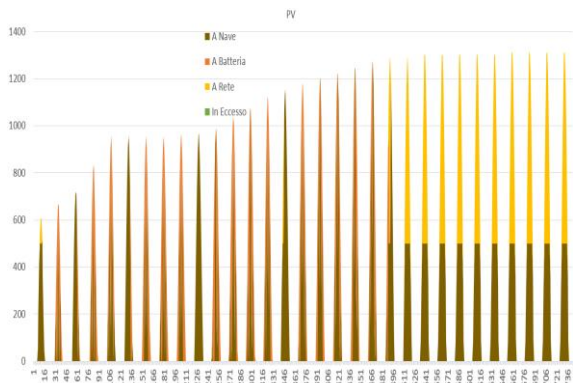
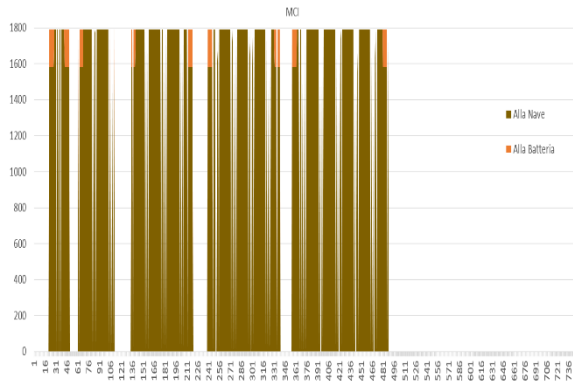
Superficie = 6.000 m²



Configurazione 3 – Gennaio [kW - ore]

Rendimento = 19%

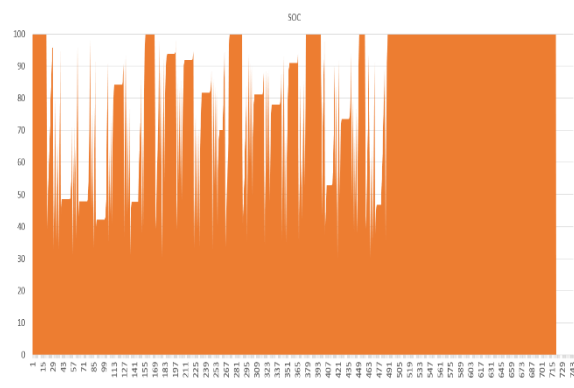
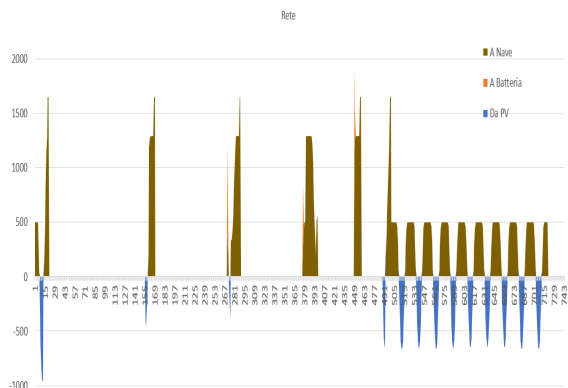
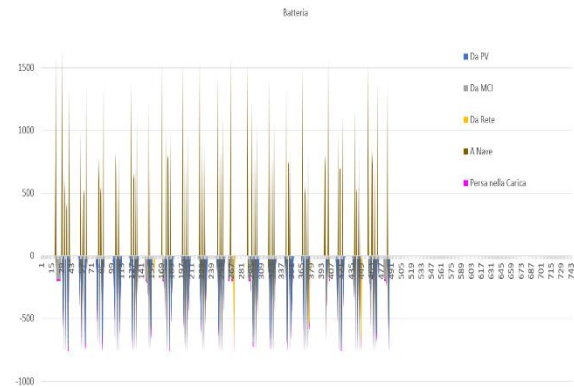
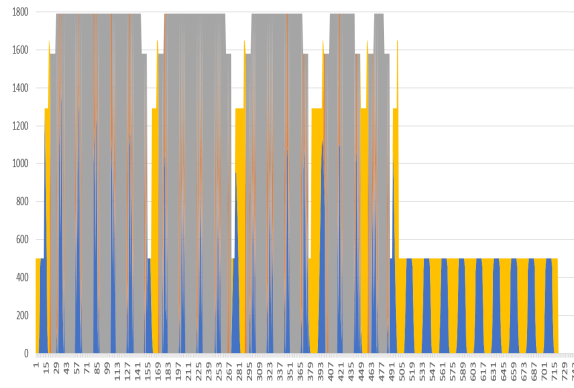
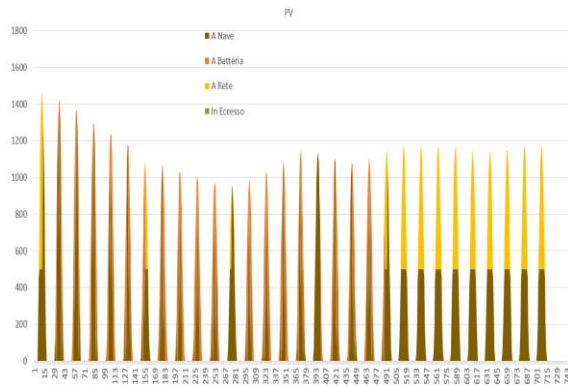
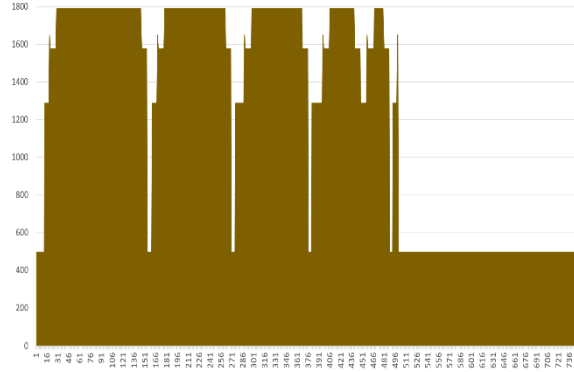
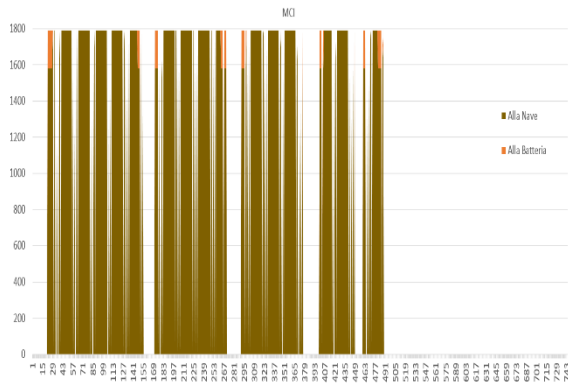
Superficie = 8.000 m²



Configurazione 3 – Aprile [kW -ore]

Rendimento = 19%

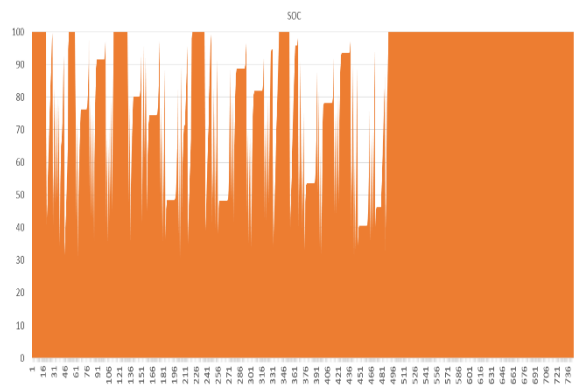
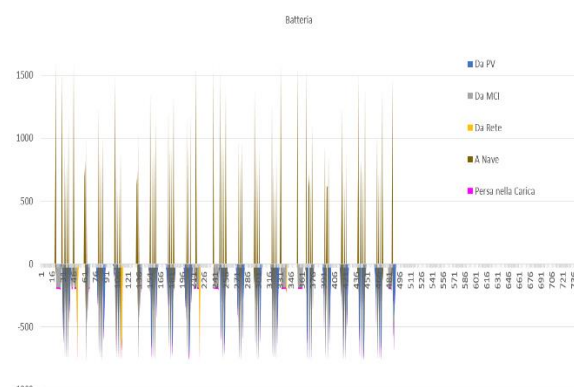
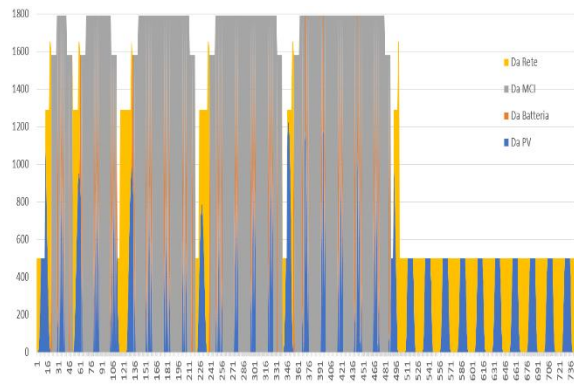
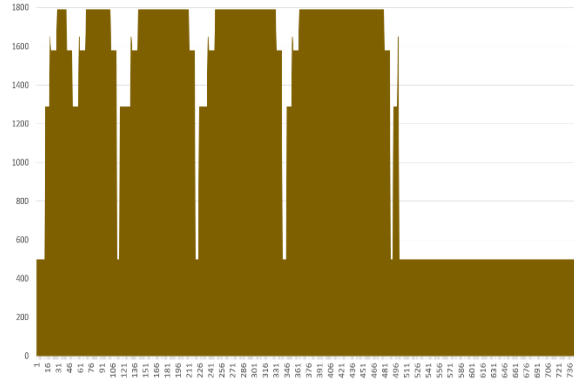
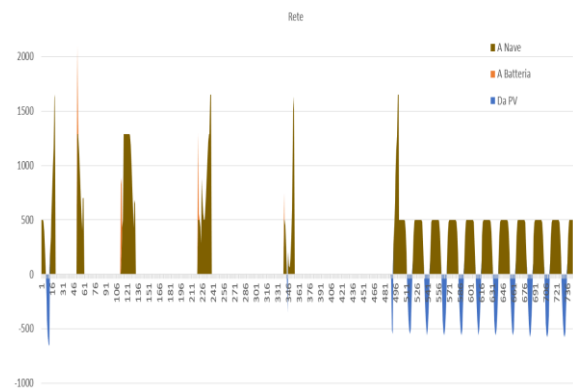
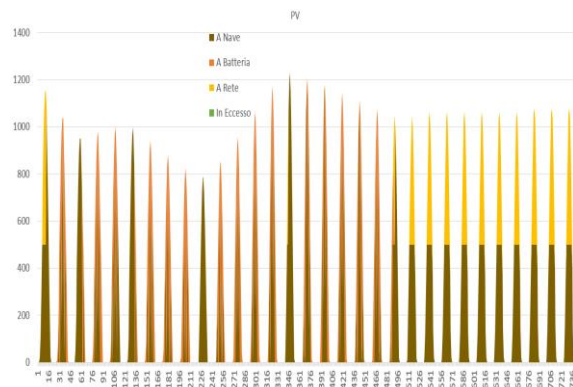
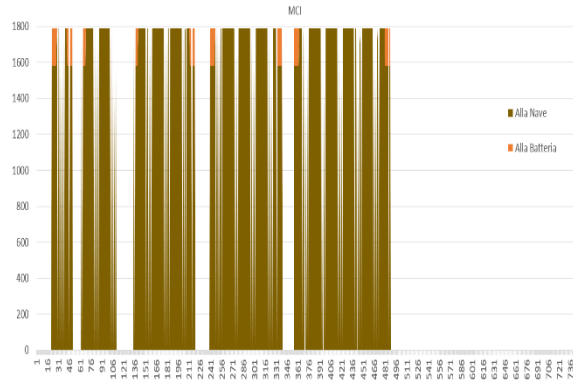
Superficie = 8.000 m²



Configurazione 3 – Luglio [kW -ore]

Rendimento = 19%

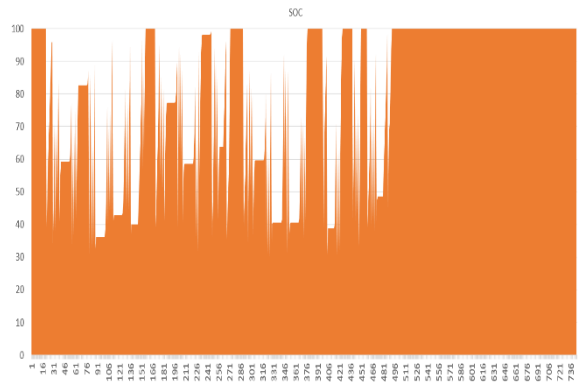
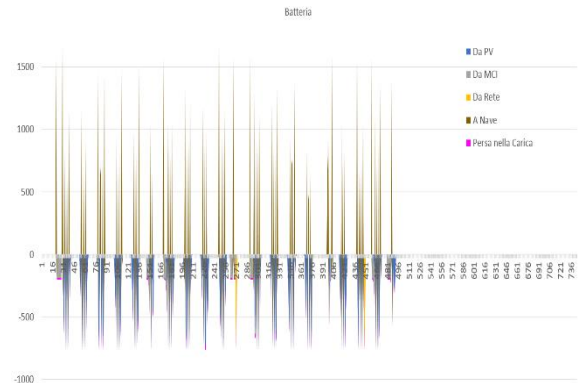
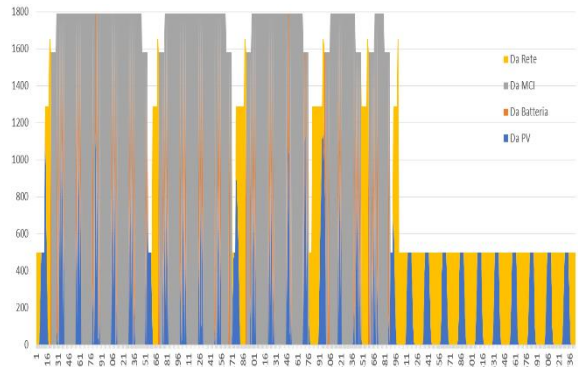
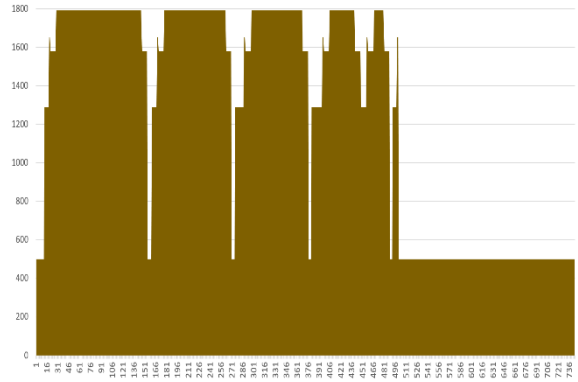
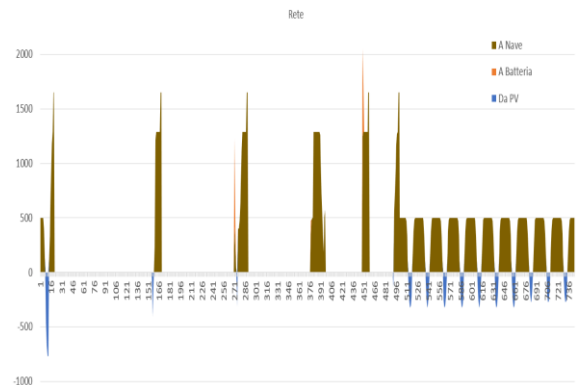
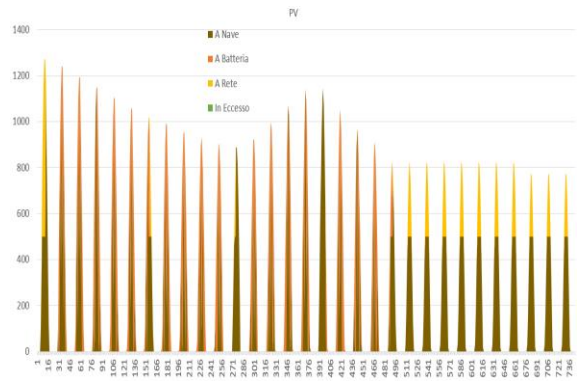
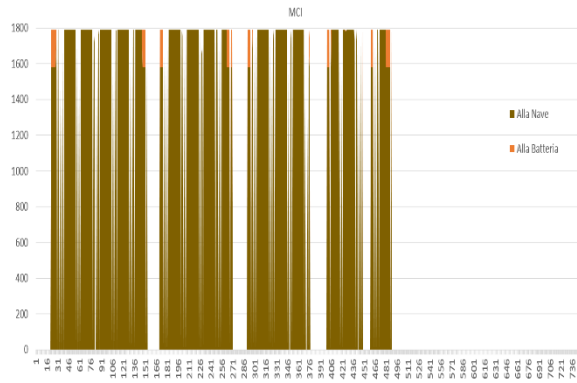
Superficie = 8.000 m²



Configurazione 3 – Ottobre [kW -ore]

Rendimento = 19%

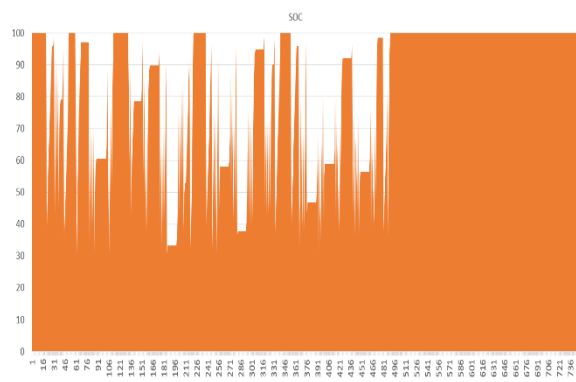
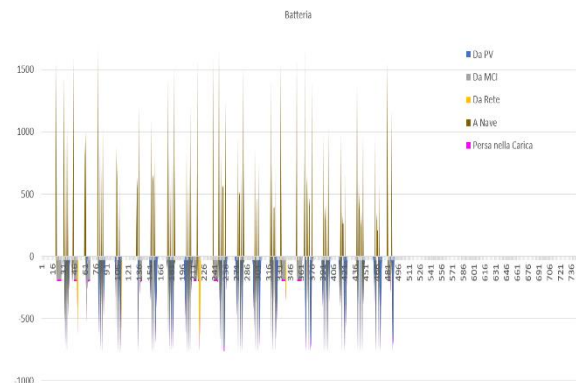
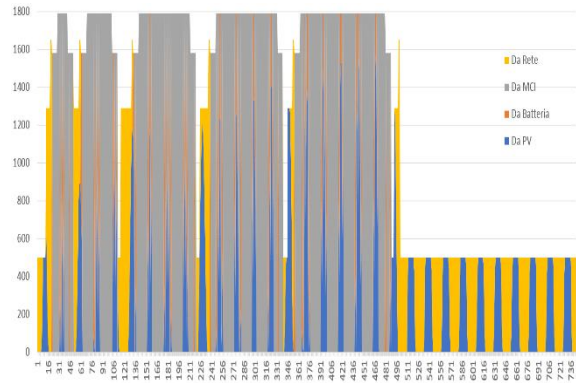
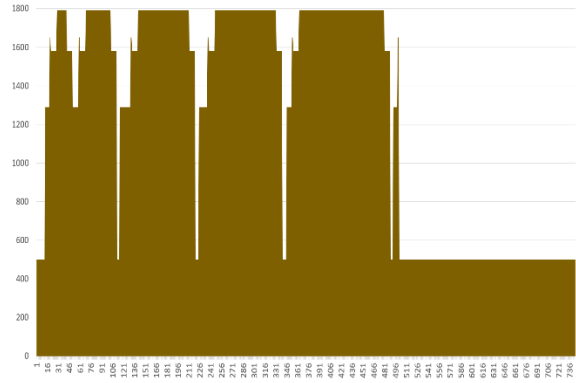
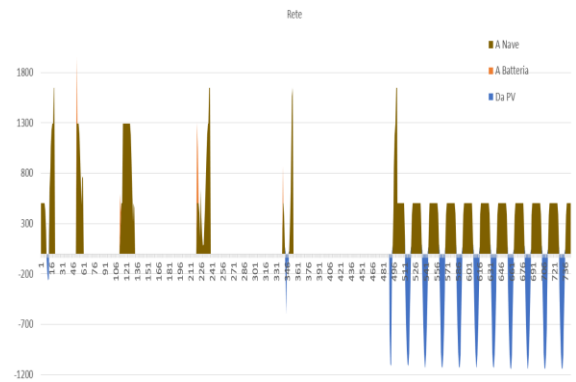
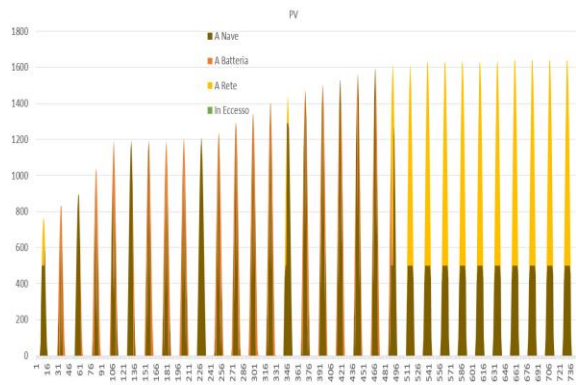
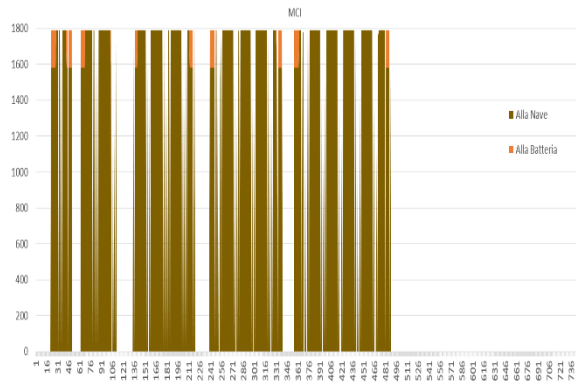
Superficie = 8.000 m²



Configurazione 3 – Gennaio [kW - ore]

Rendimento = 19%

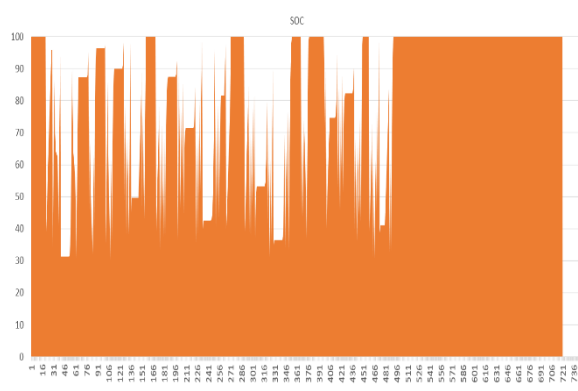
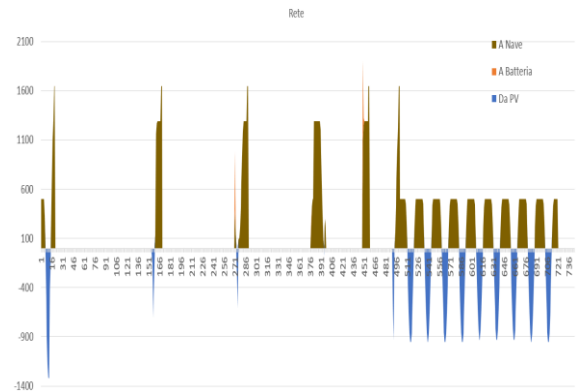
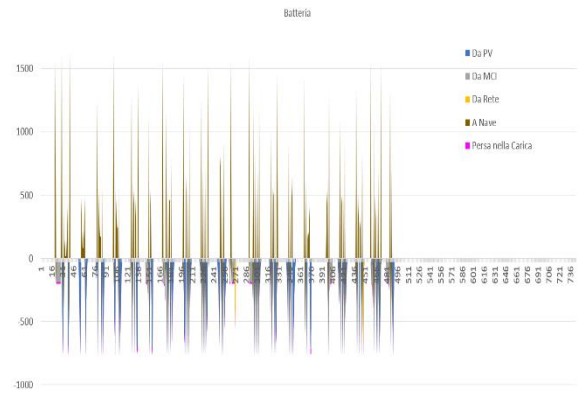
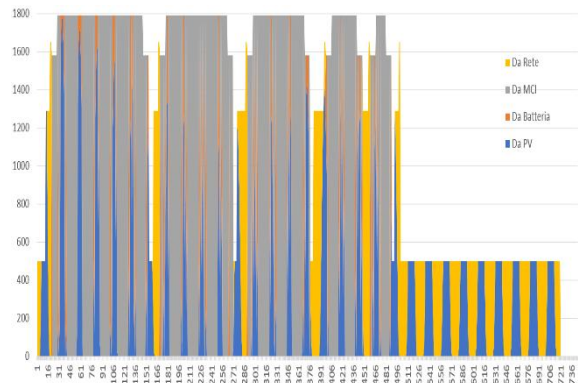
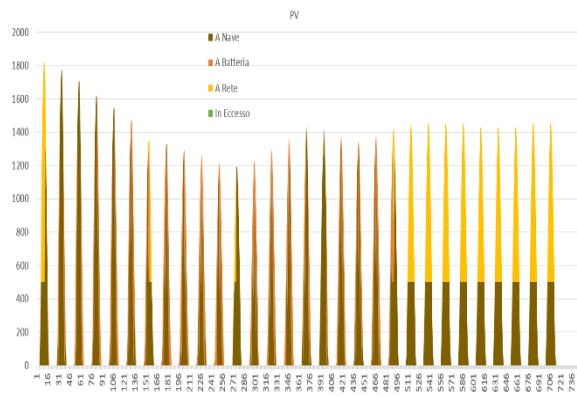
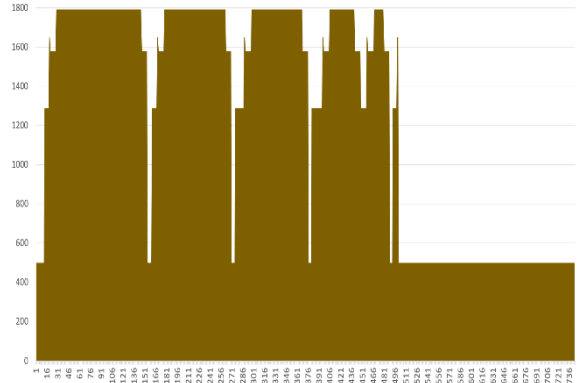
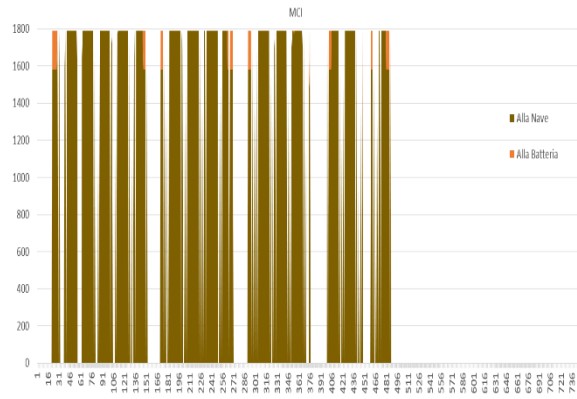
Superficie = 10.000 m²



Configurazione 3 – Aprile [kW -ore]

Rendimento = 19%

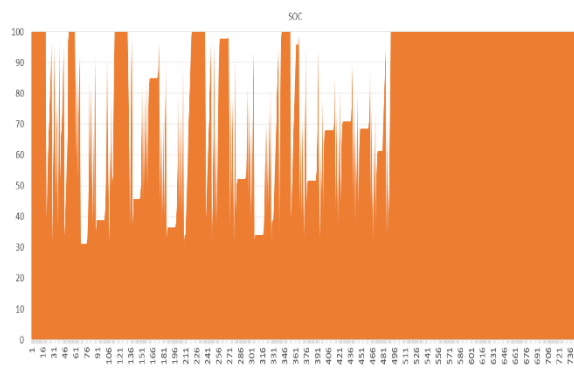
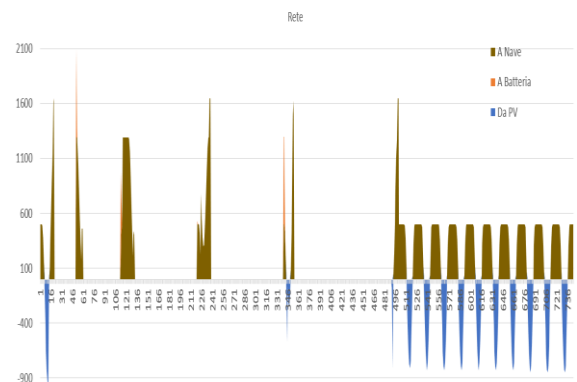
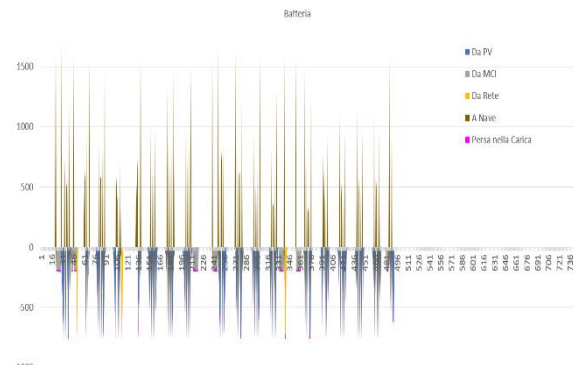
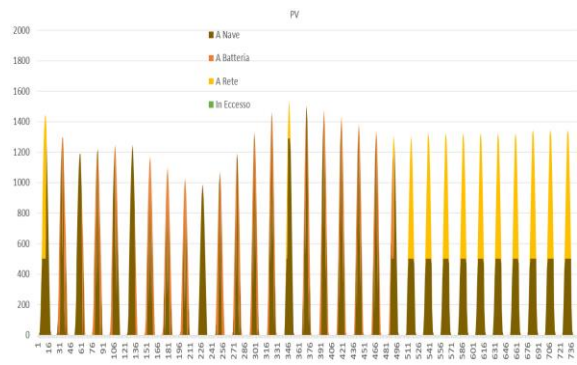
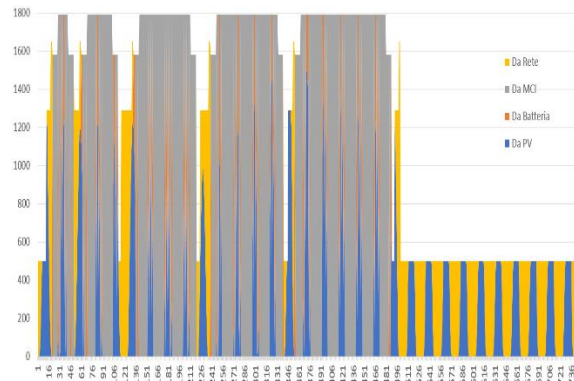
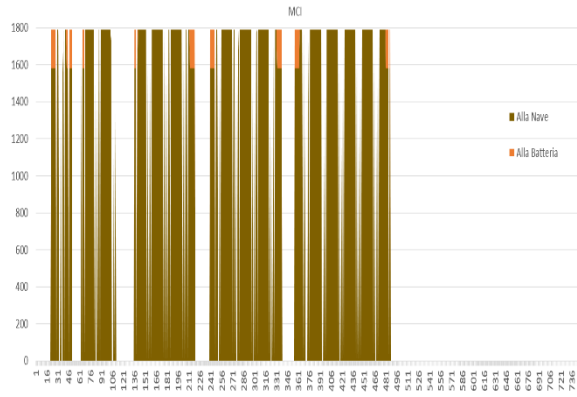
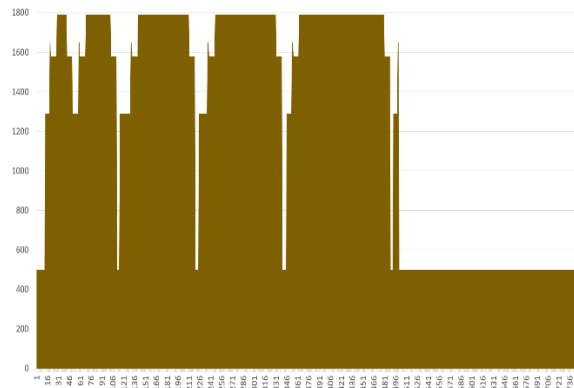
Superficie = 10.000 m²



Configurazione 3 – Luglio [kW -ore]

Rendimento = 19%

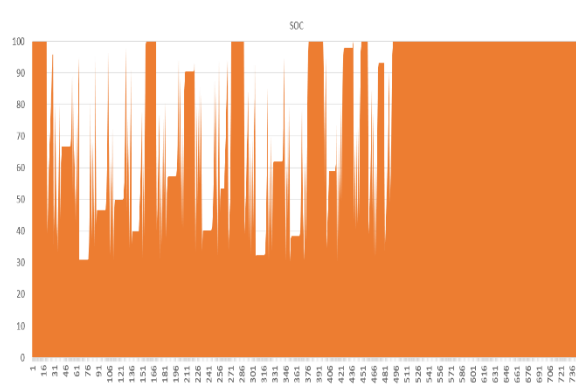
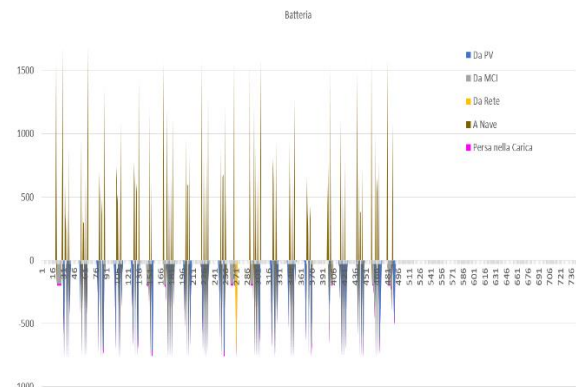
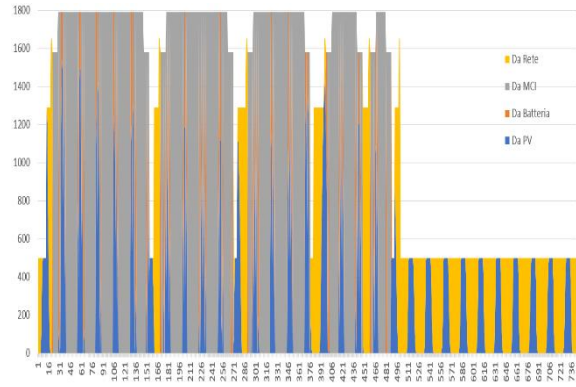
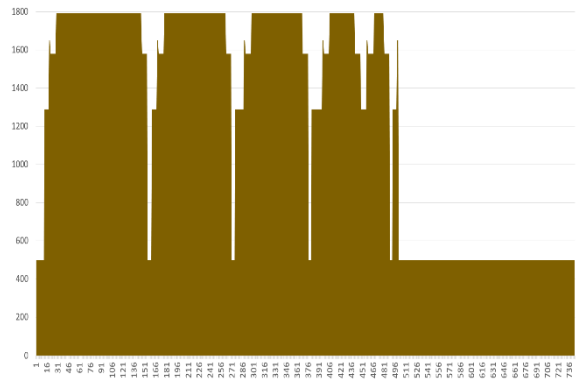
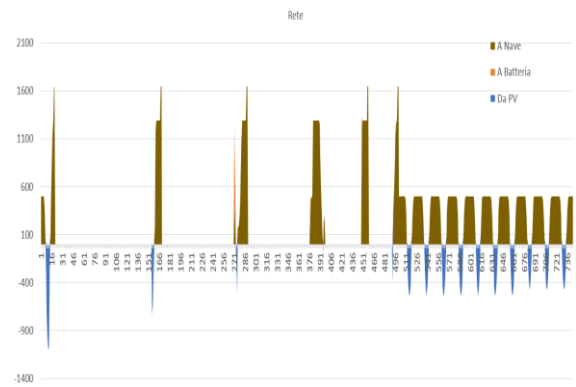
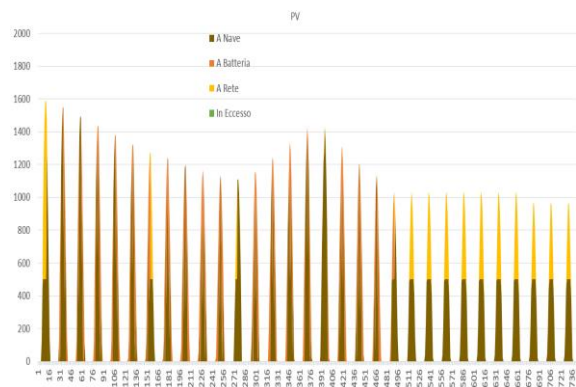
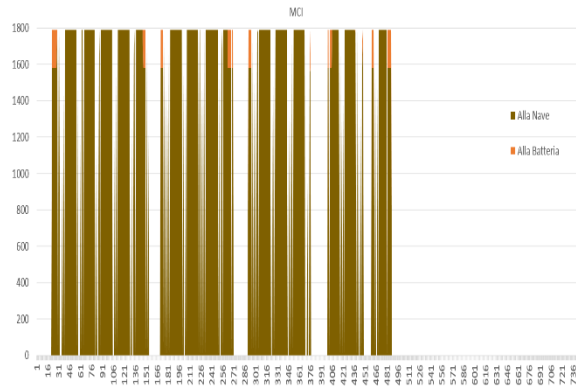
Superficie = 10.000 m²



Configurazione 3 – Ottobre [kW -ore]

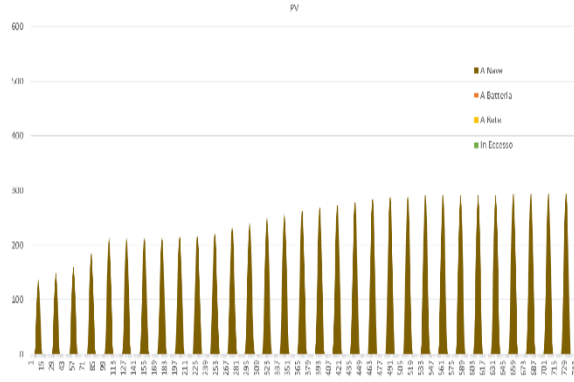
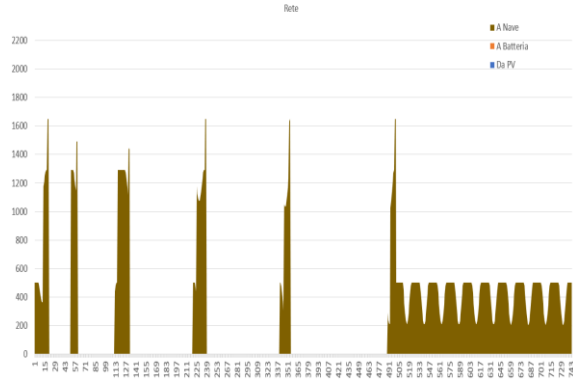
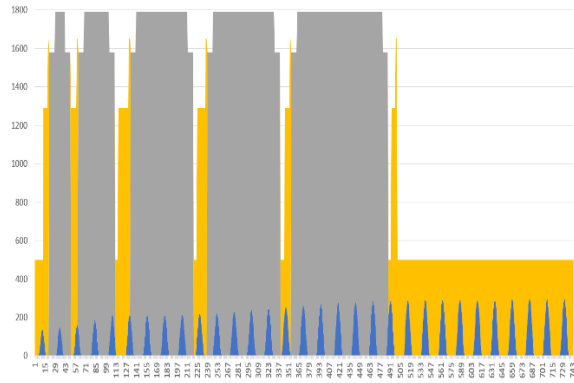
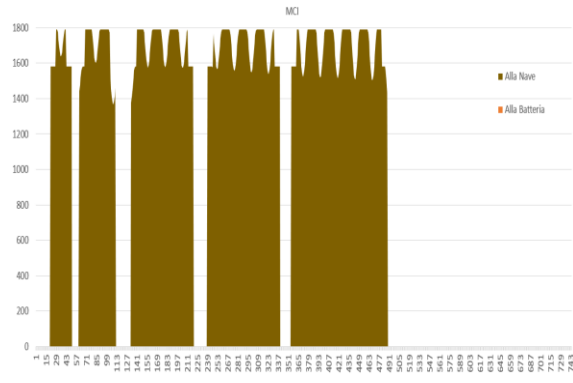
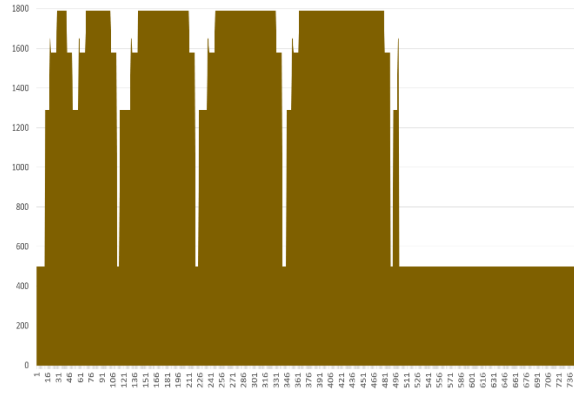
Rendimento = 19%

Superficie = 10.000 m²



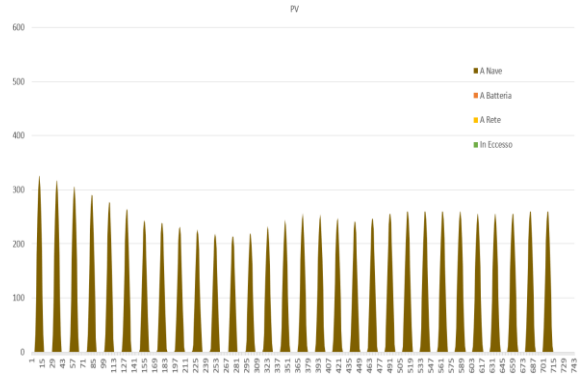
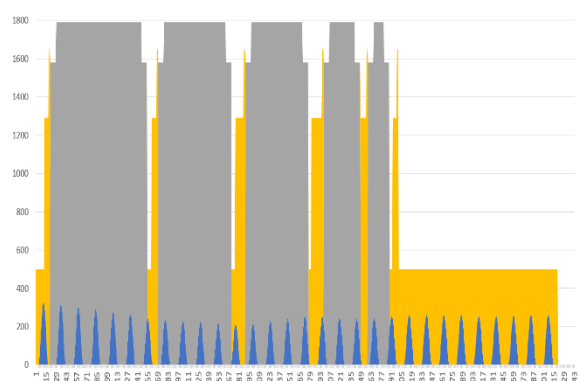
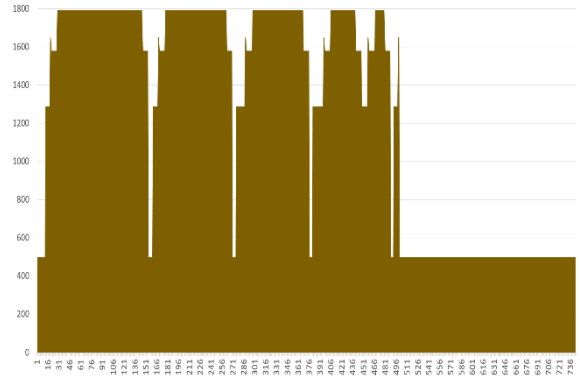
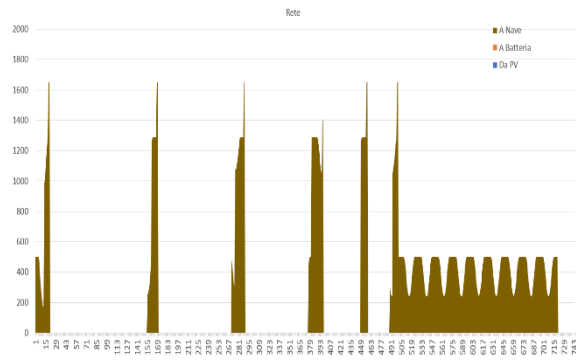
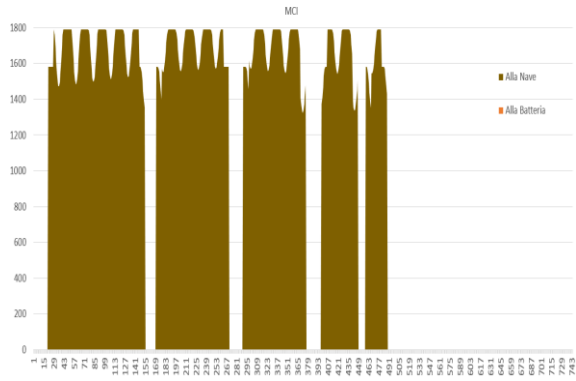
Configurazione 4 – Gennaio [kW - ore]

Capacità = 0 kWh



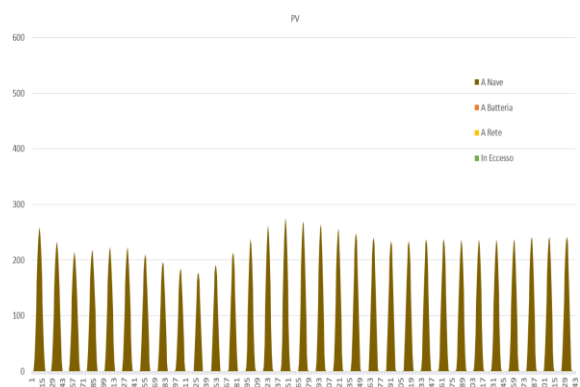
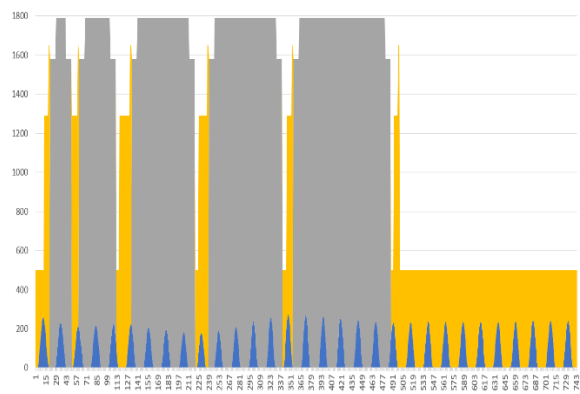
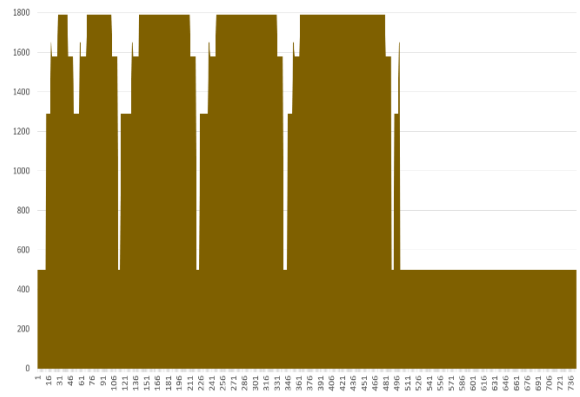
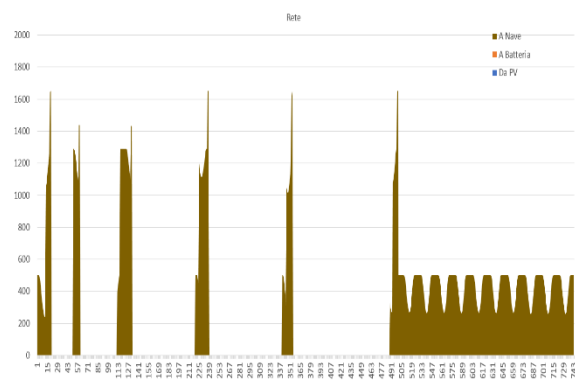
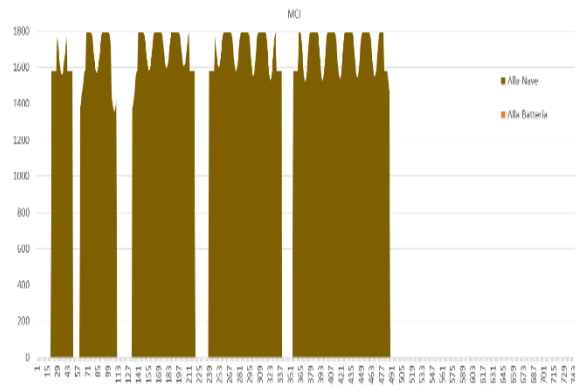
Configurazione 4 – Aprile kW - ore]

Capacità = 0 kWh



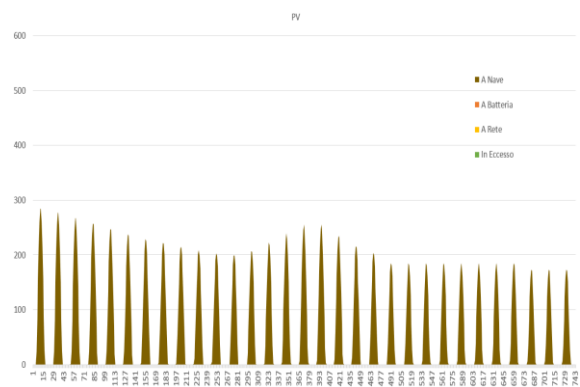
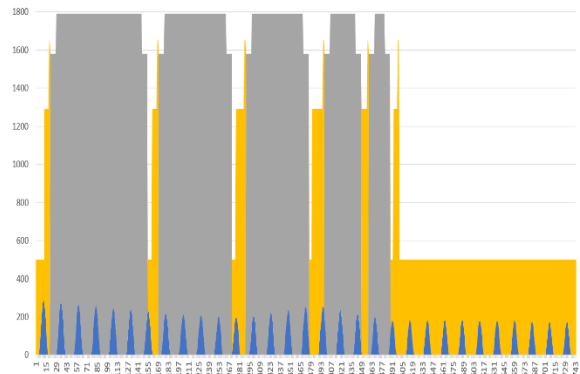
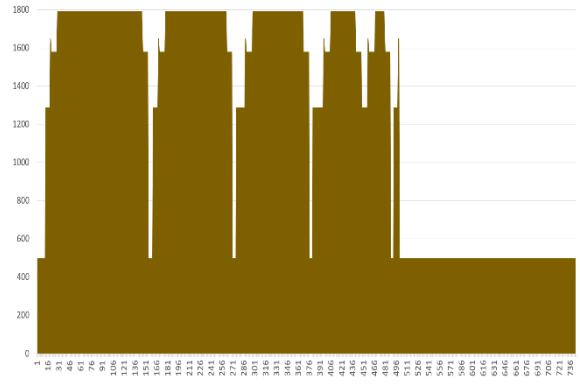
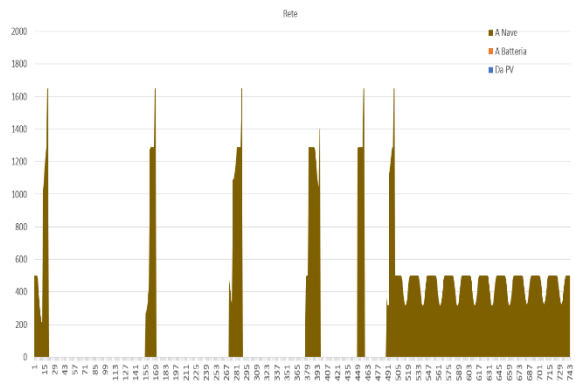
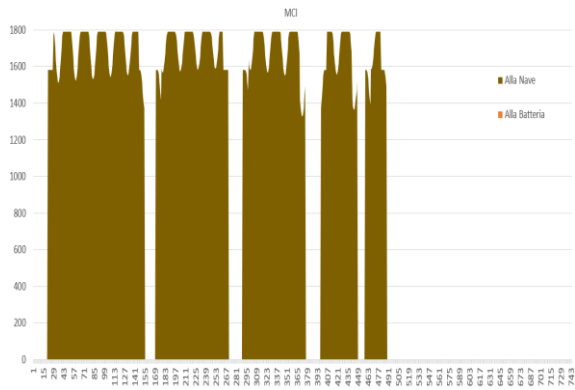
Configurazione 4 – Luglio [kW - ore]

Capacità = 0 kWh



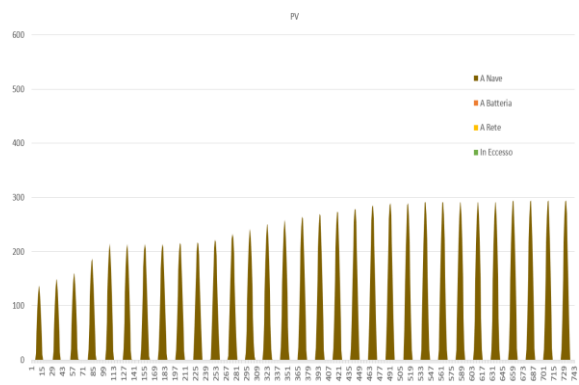
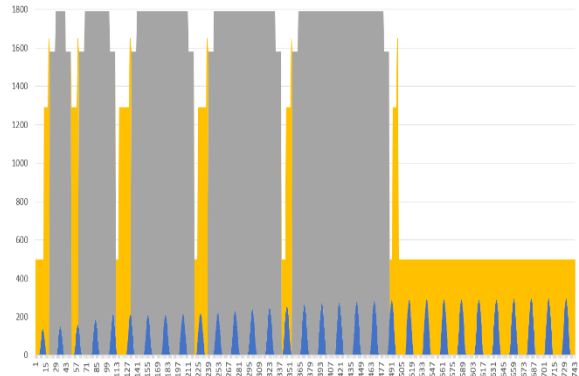
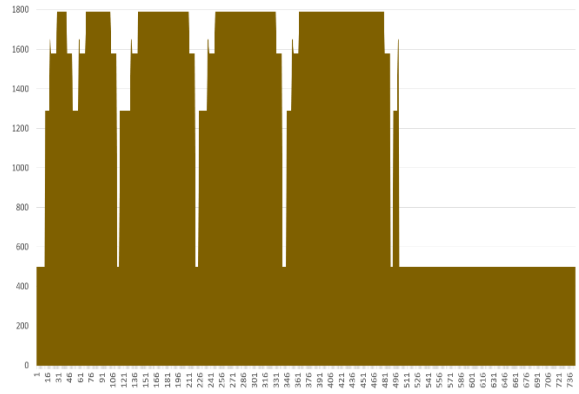
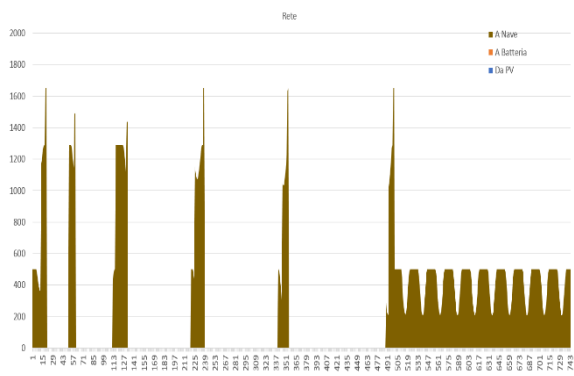
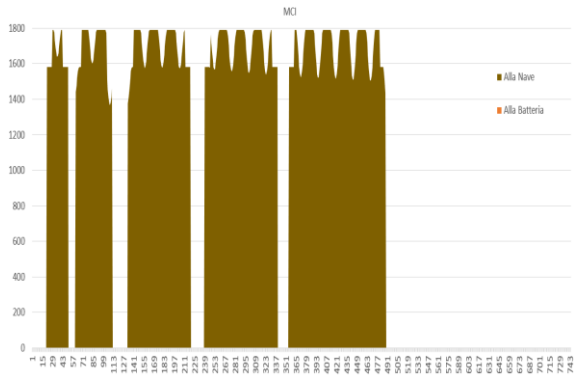
Configurazione 4 – Ottobre [kW - ore]

Capacità = 0 kWh



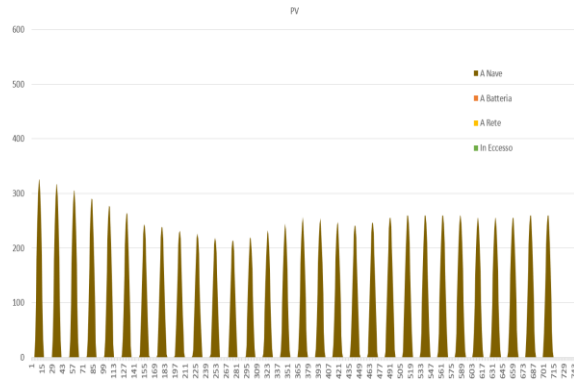
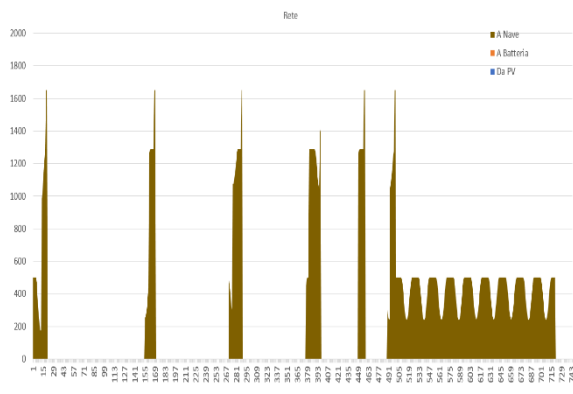
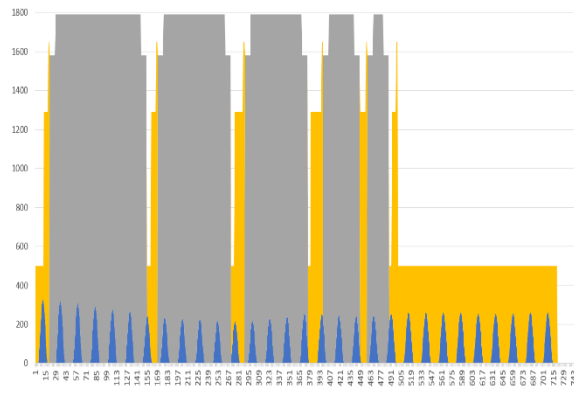
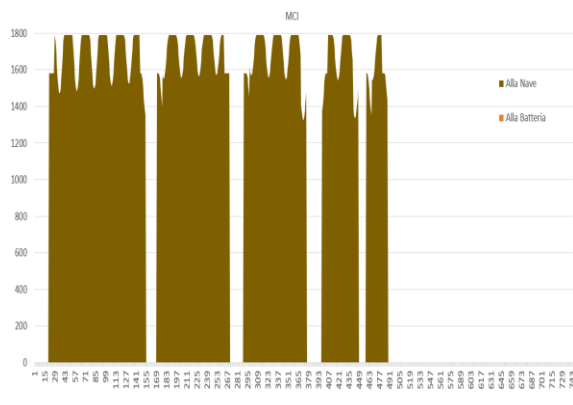
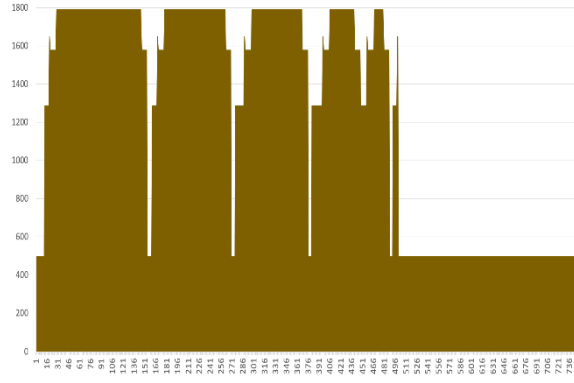
Configurazione 4 – Gennaio [kW - ore]

Capacità = 1.500 kWh



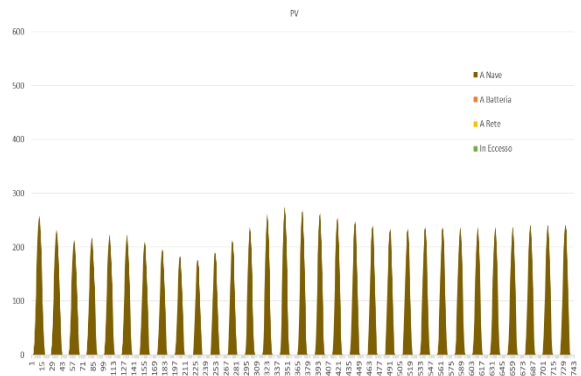
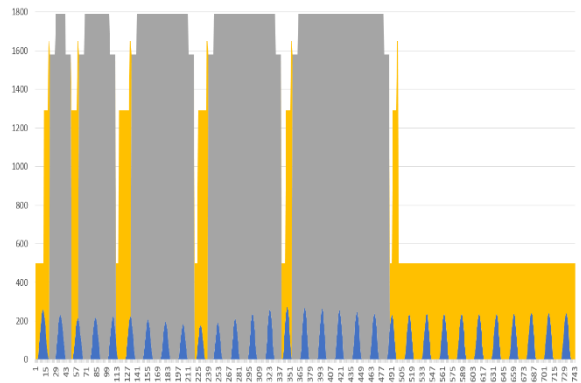
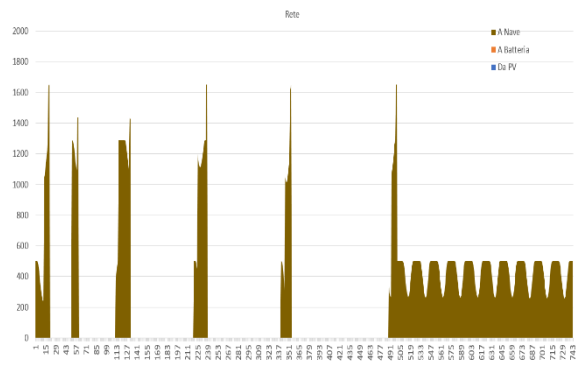
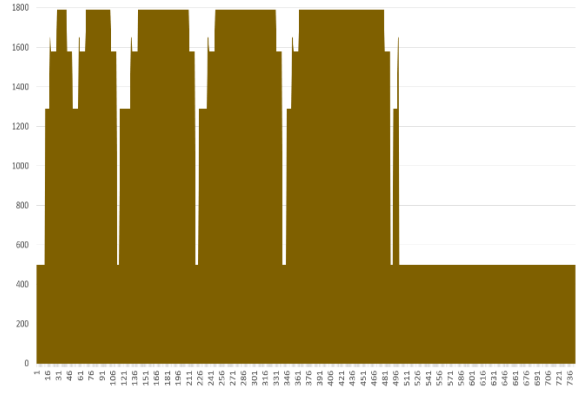
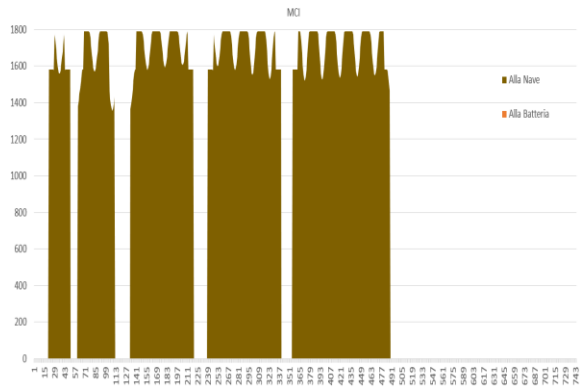
Configurazione 4 – Aprile [kW - ore]

Capacità = 1.500 kWh



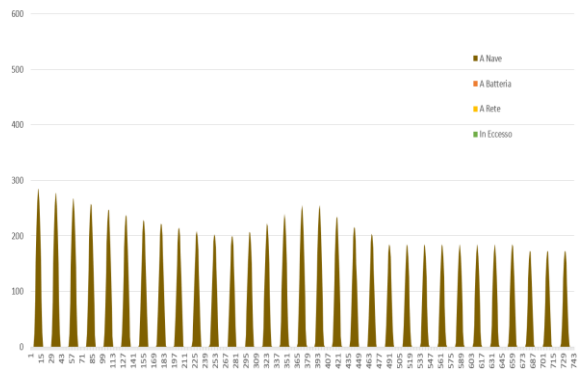
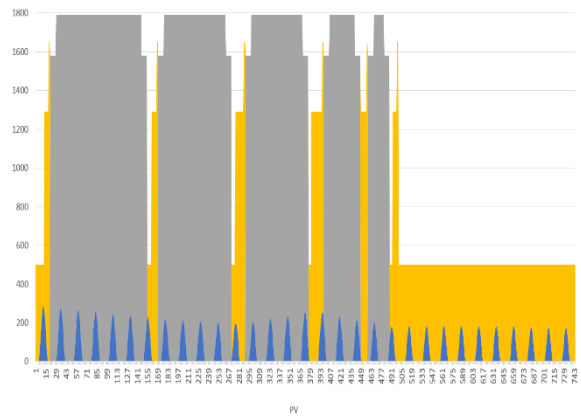
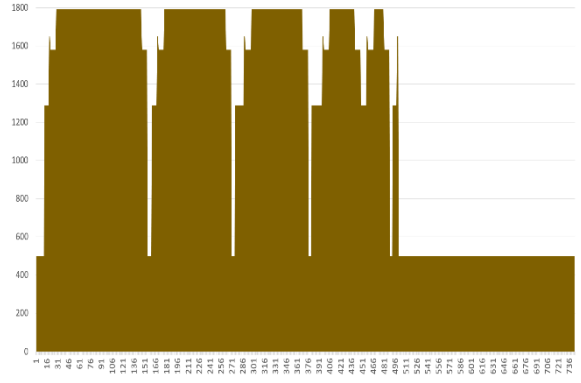
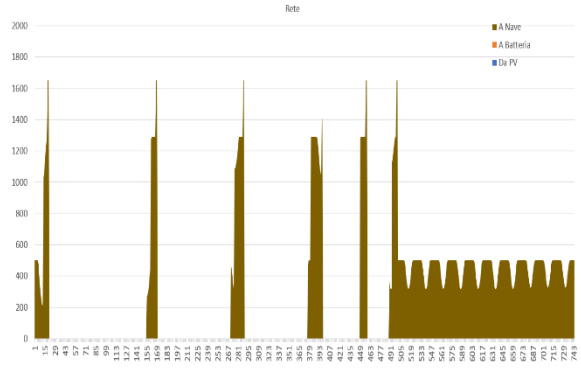
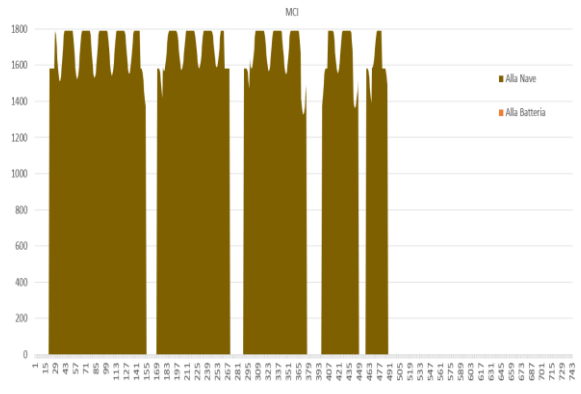
Configurazione 4 – Luglio [kW - ore]

Capacità = 1.500 kWh



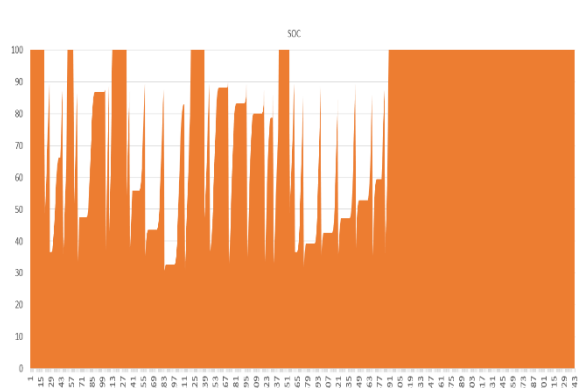
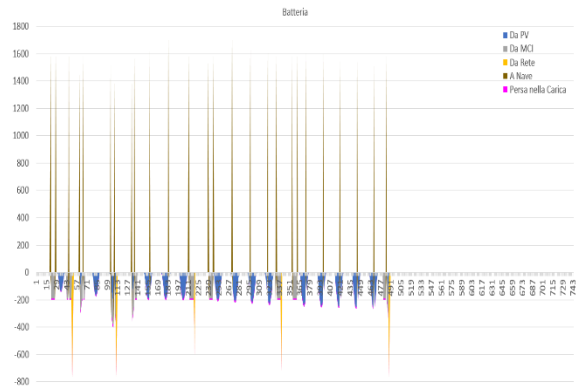
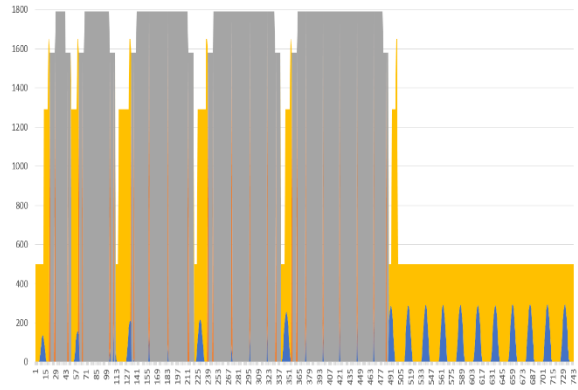
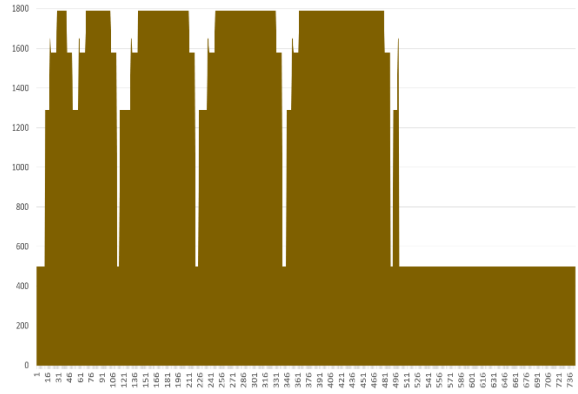
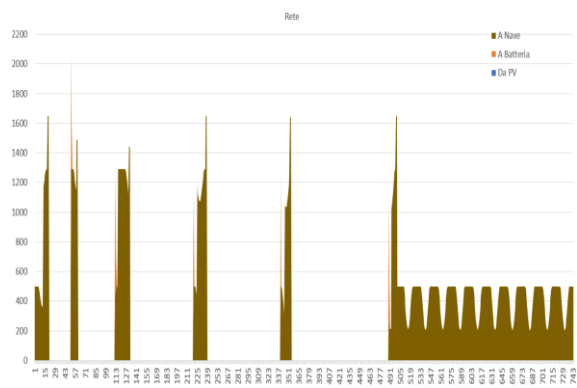
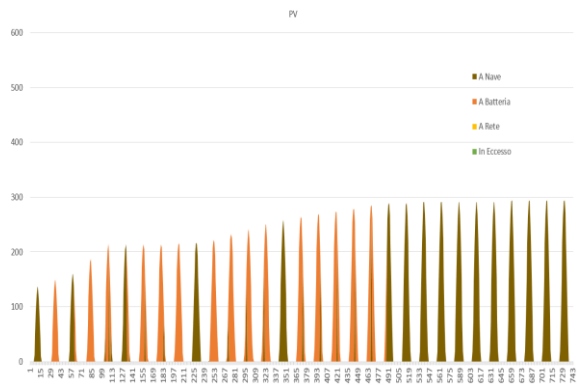
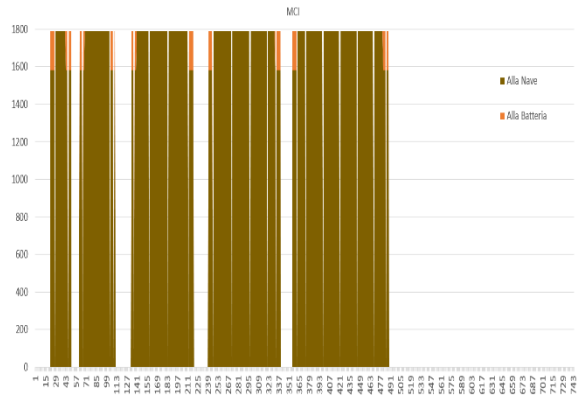
Configurazione 4 – Ottobre [kW - ore]

Capacità = 1.500 kWh



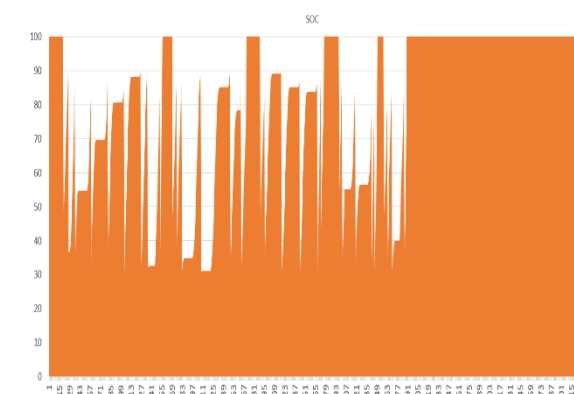
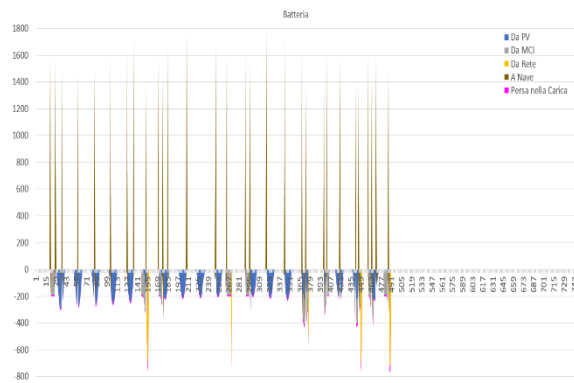
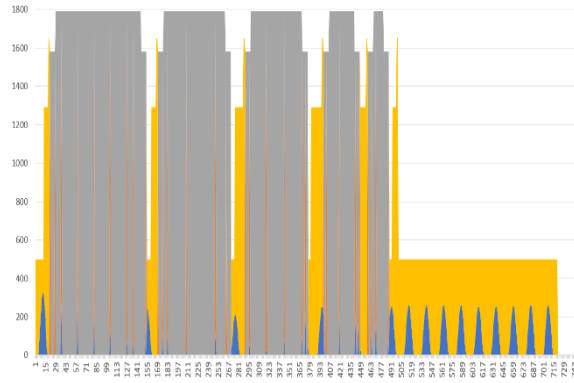
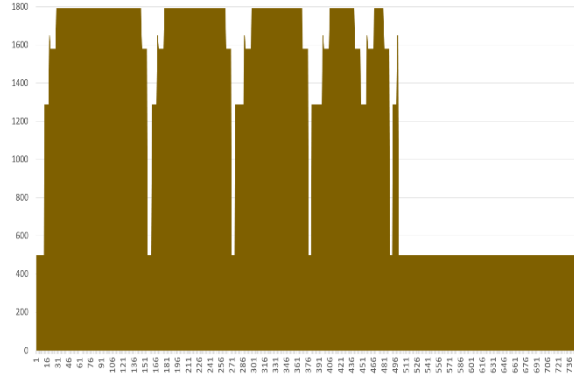
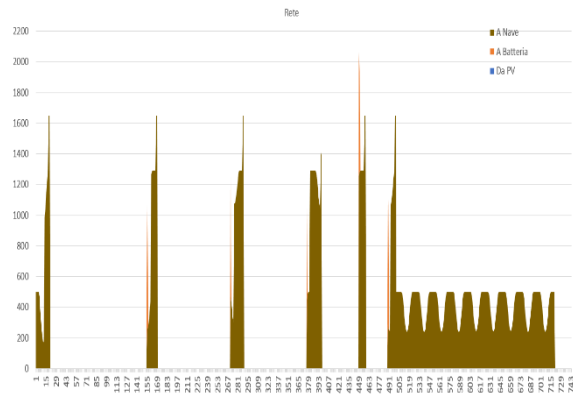
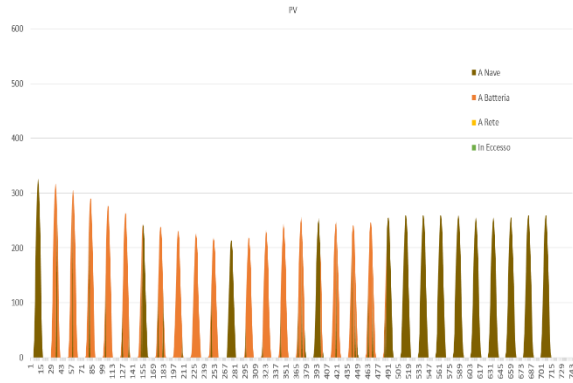
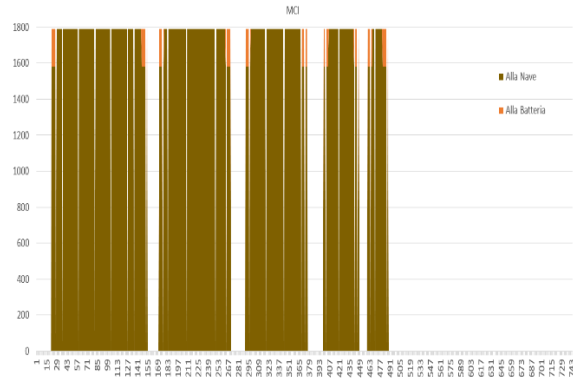
Configurazione 4 – Gennaio [kW - ore]

Capacità = 3.000 kWh



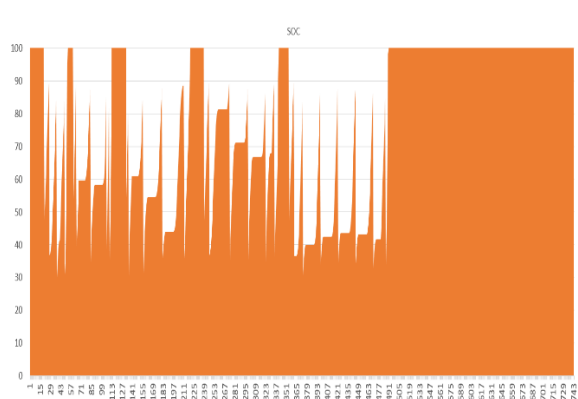
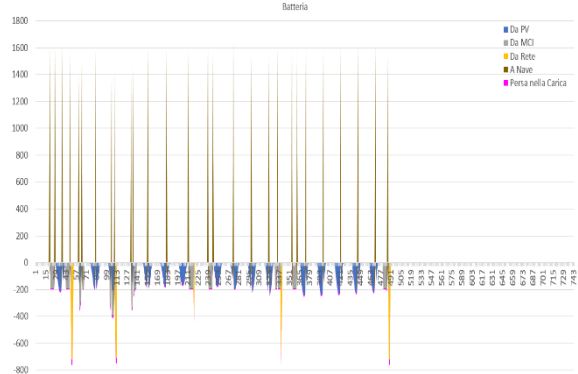
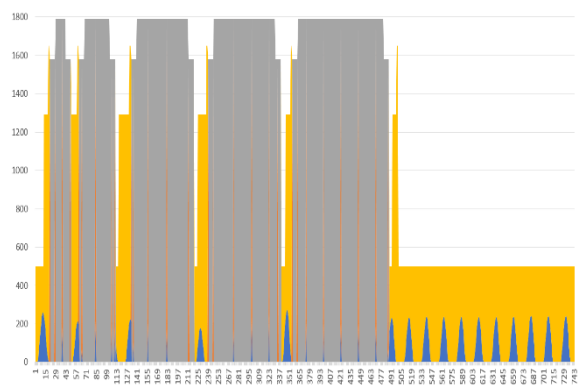
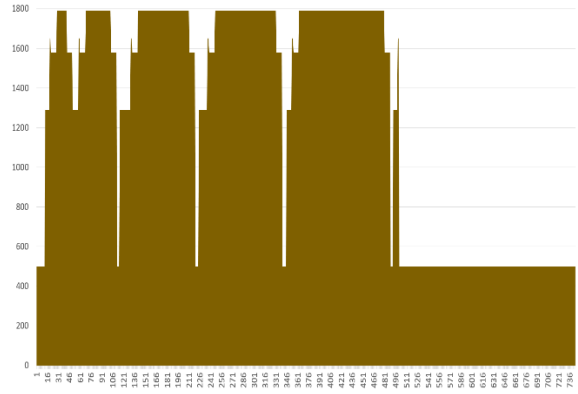
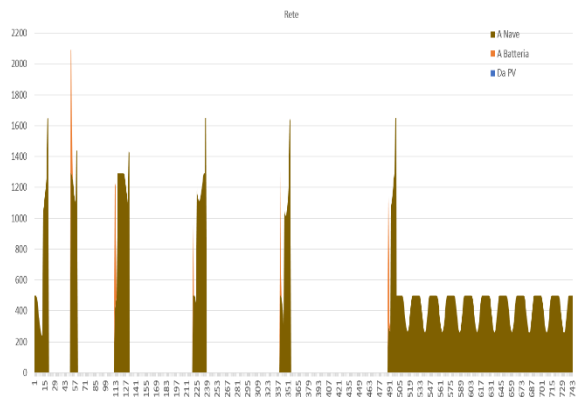
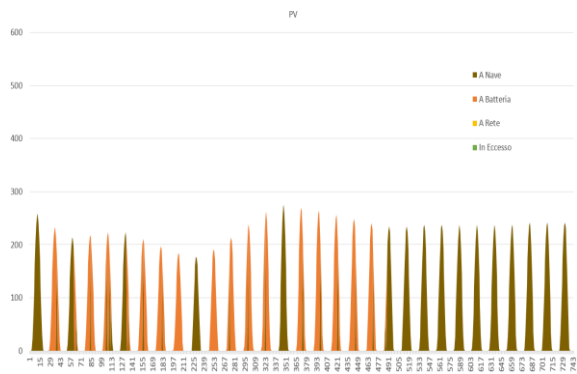
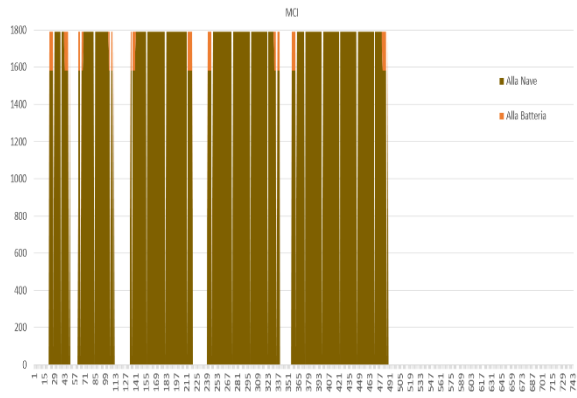
Configurazione 4 – Aprile [kW - ore]

Capacità = 3.000 kWh



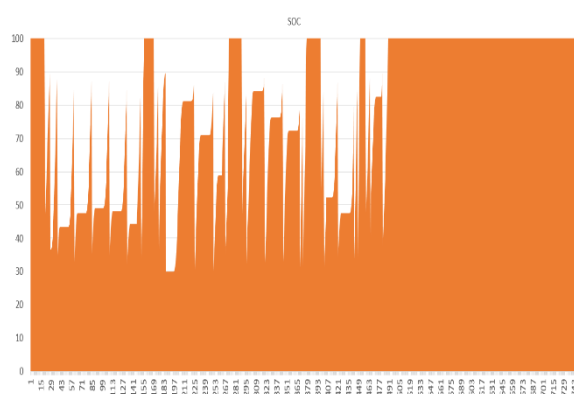
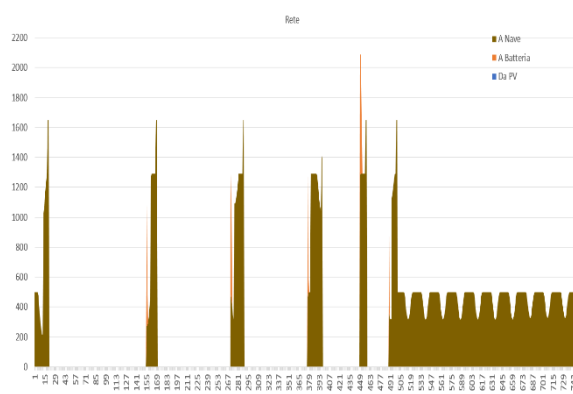
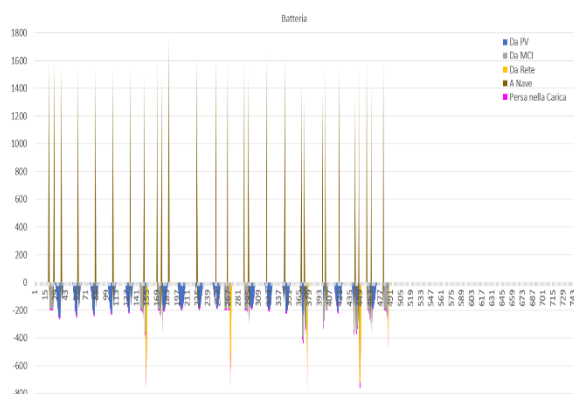
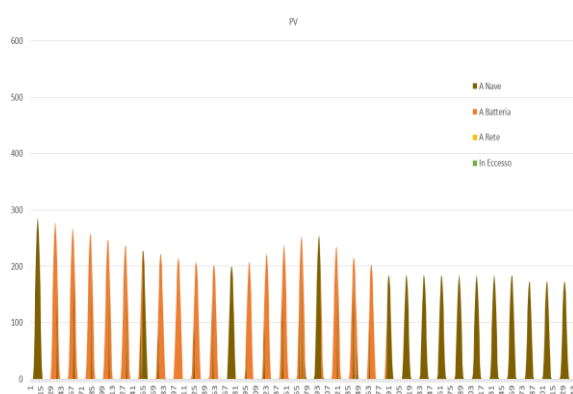
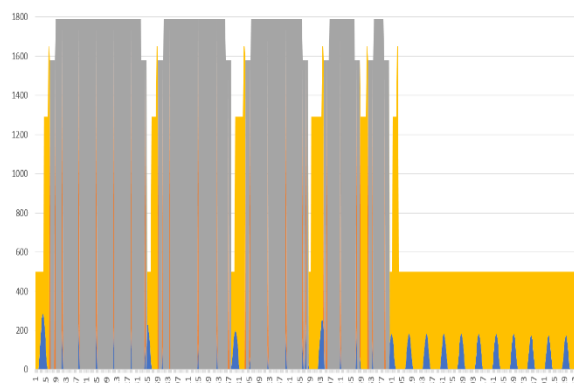
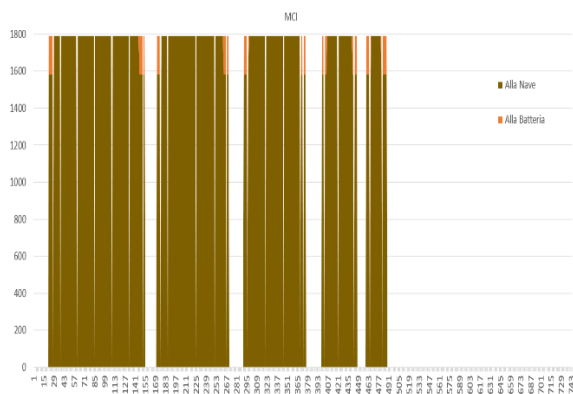
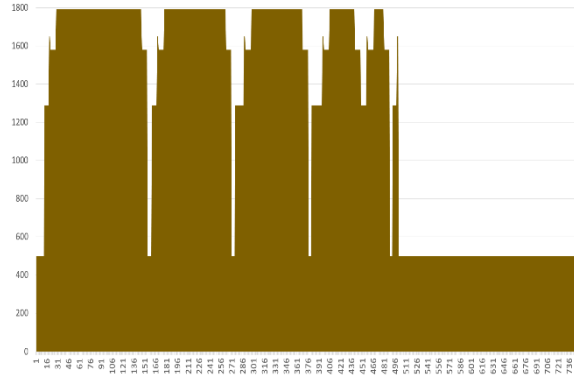
Configurazione 4 – Luglio [kW - ore]

Capacità = 3.000 kWh



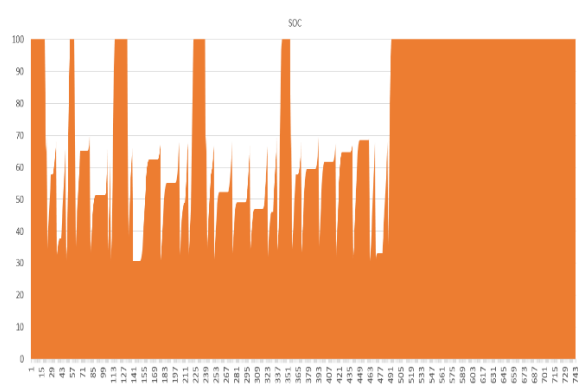
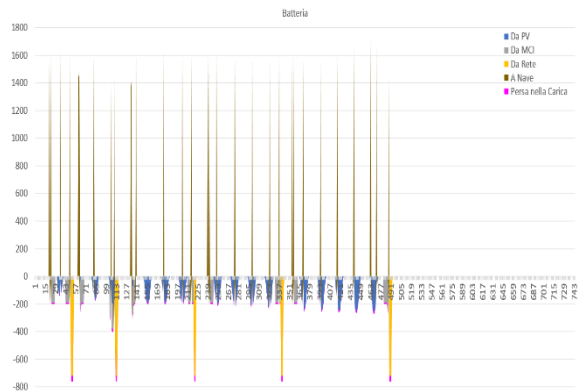
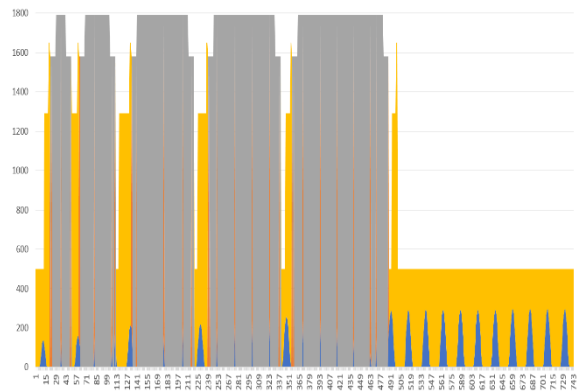
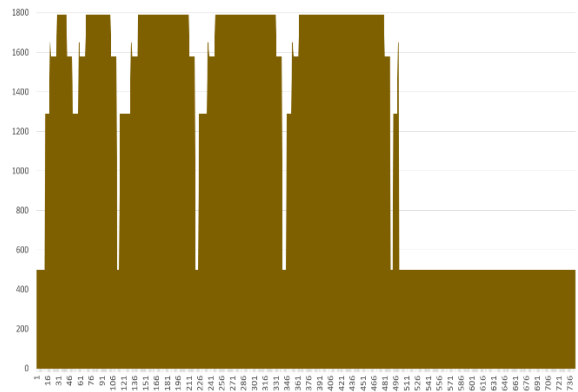
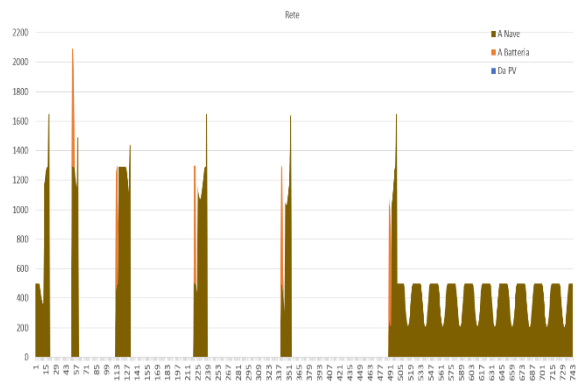
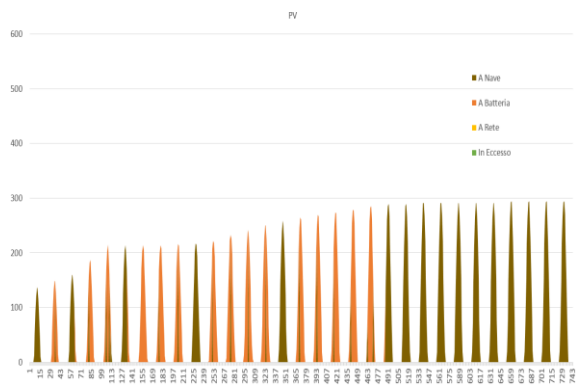
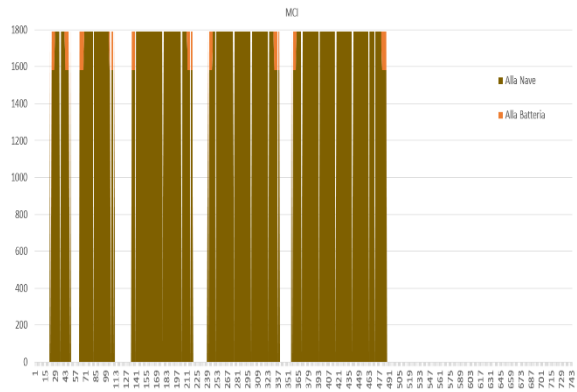
Configurazione 4 – Ottobre [kW - ore]

Capacità = 3.000 kWh



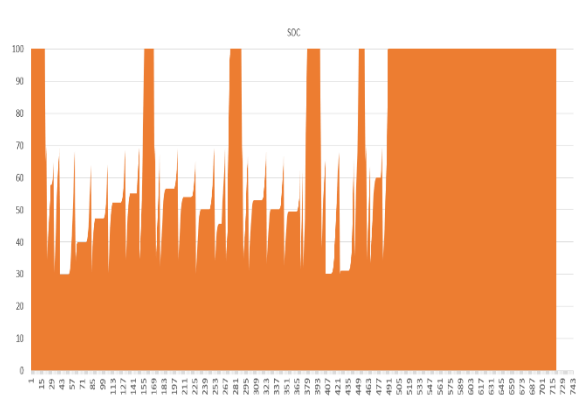
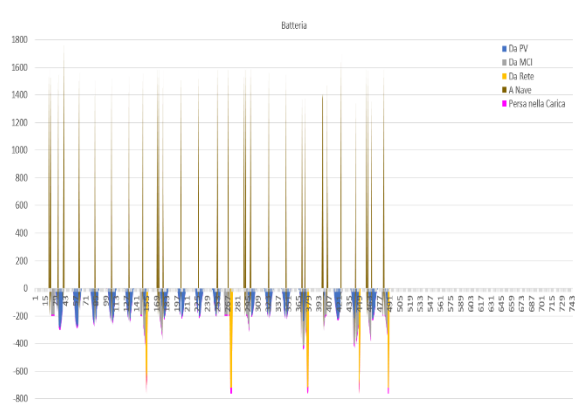
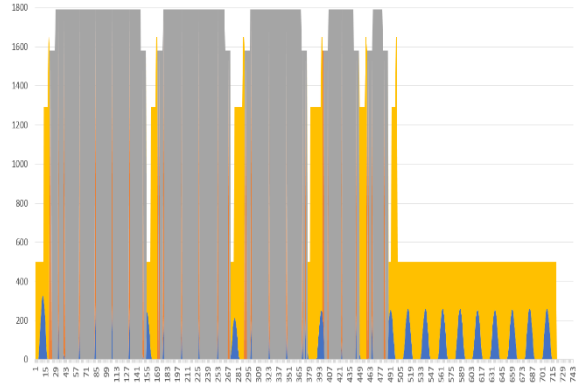
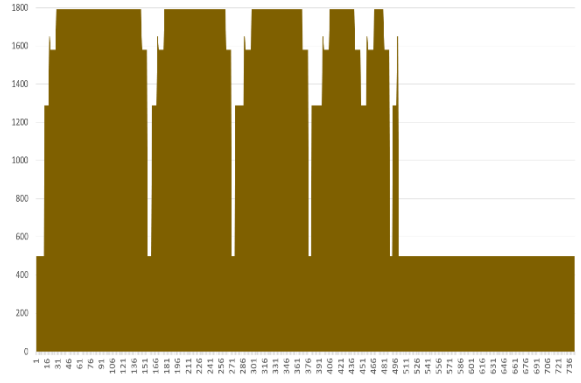
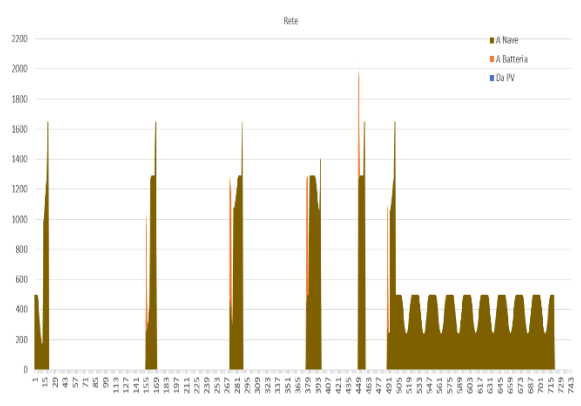
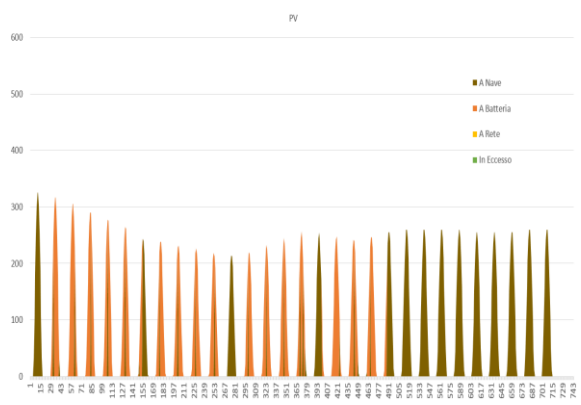
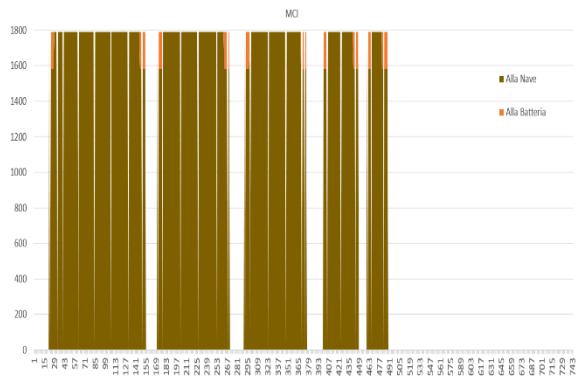
Configurazione 4 – Gennaio [kW - ore]

Capacità = 4.500 kWh



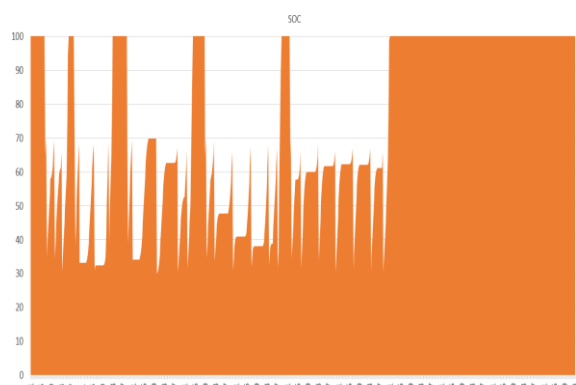
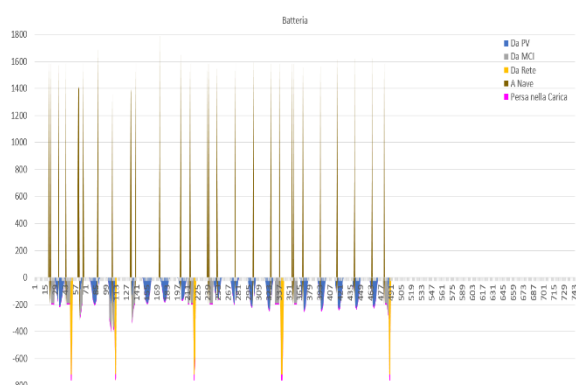
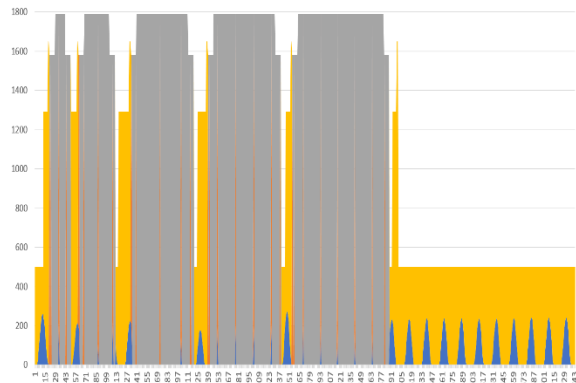
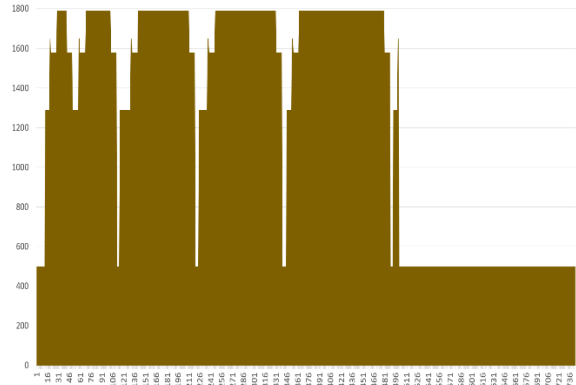
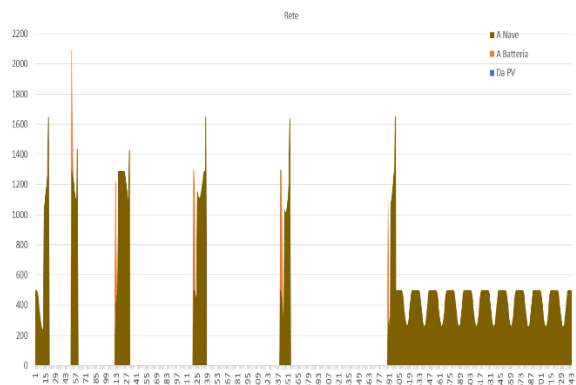
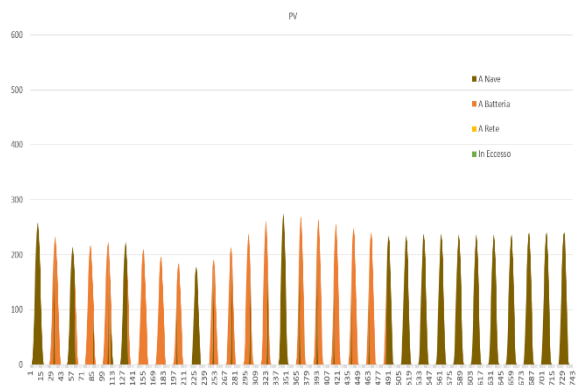
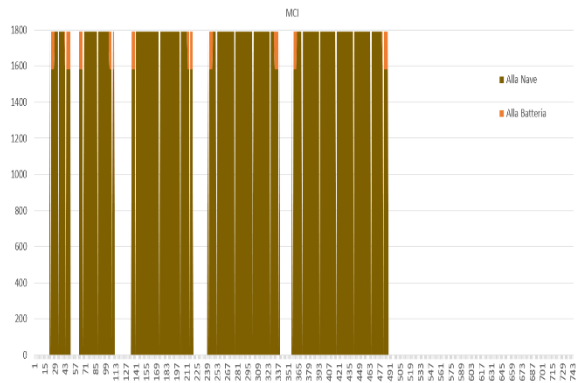
Configurazione 4 – Aprile [kW - ore]

Capacità = 4.500 kWh



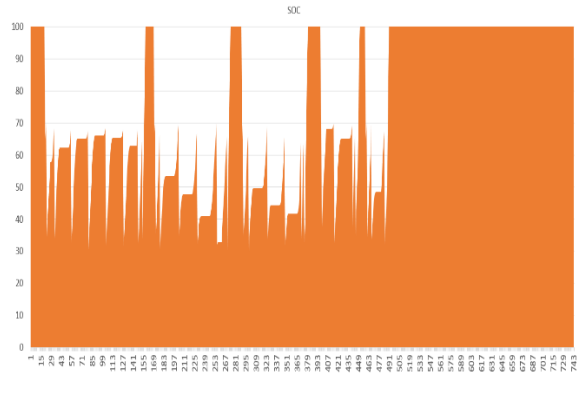
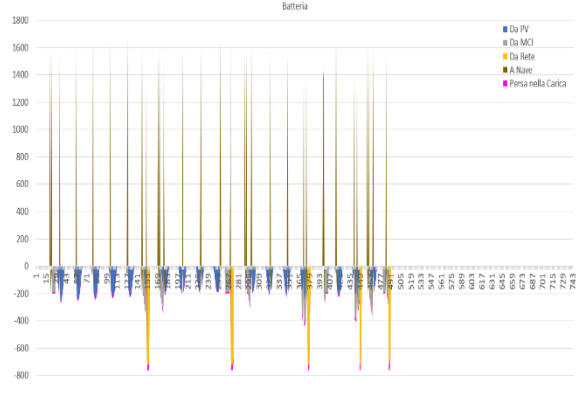
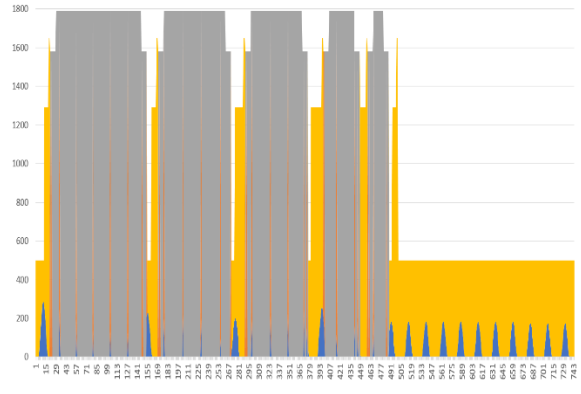
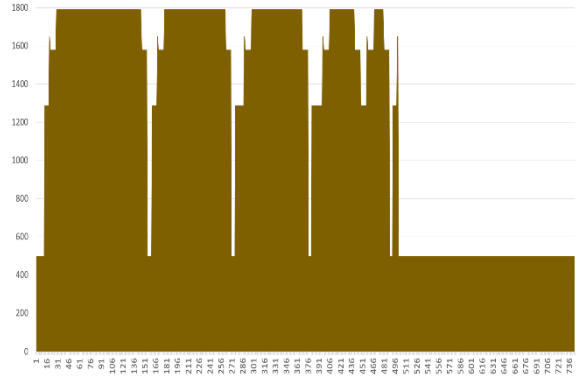
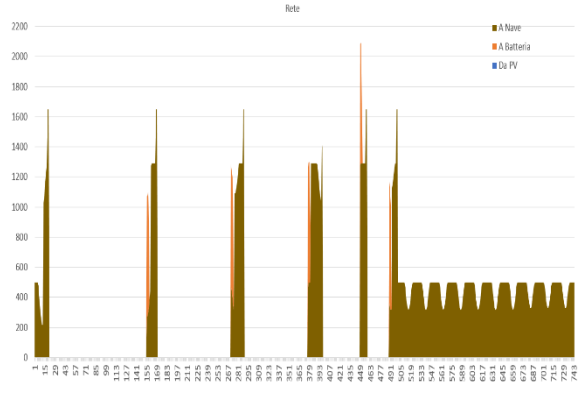
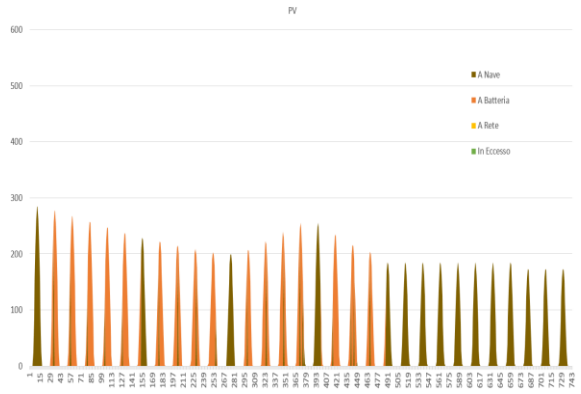
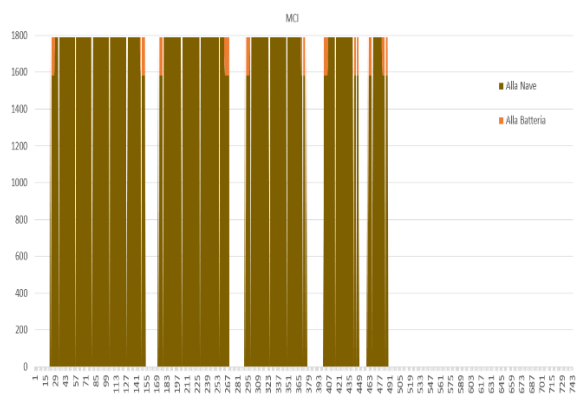
Configurazione 4 – Luglio [kW – ore]

Capacità = 4.500 kWh



Configurazione 4 – Ottobre [kW - ore]

Capacità = 4.500 kWh

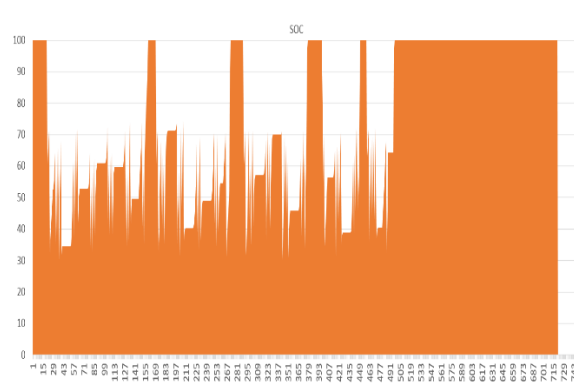
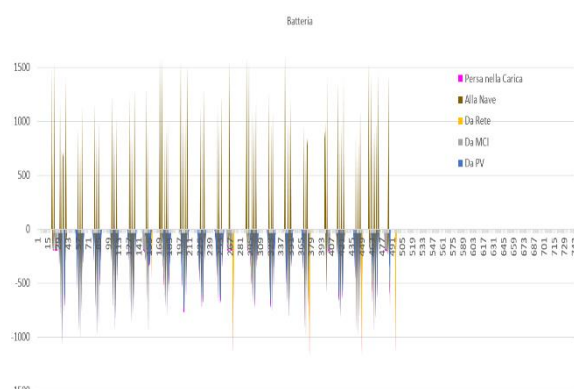
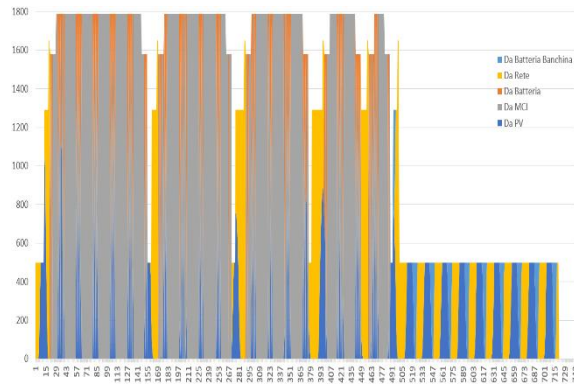
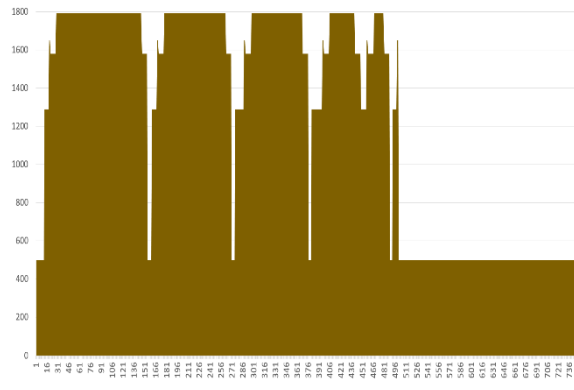
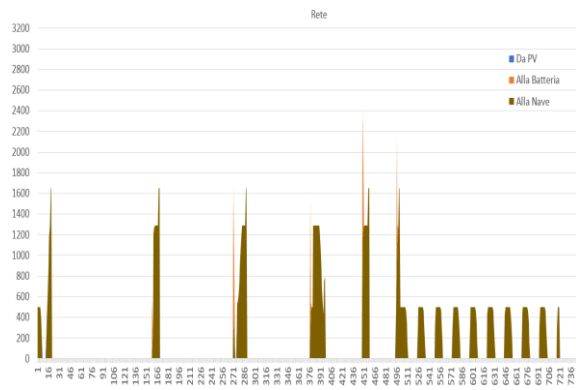
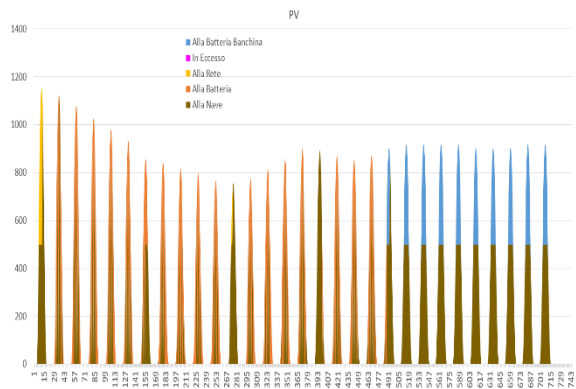
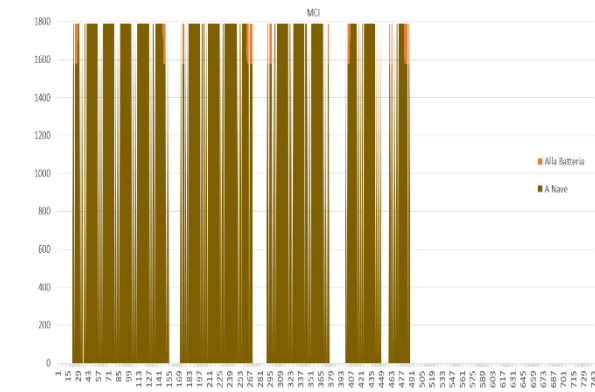


Configurazione 5 – Aprile [kW - ore]

Rendimento = 20%

Superficie = 6.000 m²

Capacità = 4.000 kWh

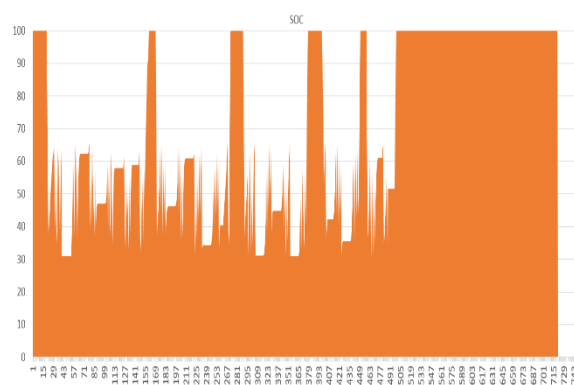
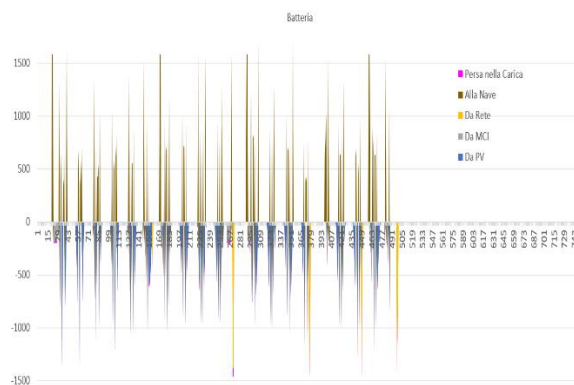
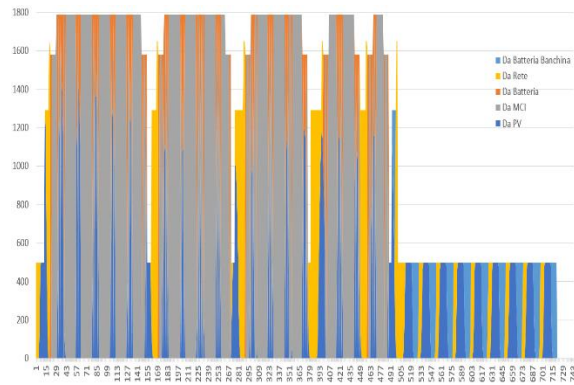
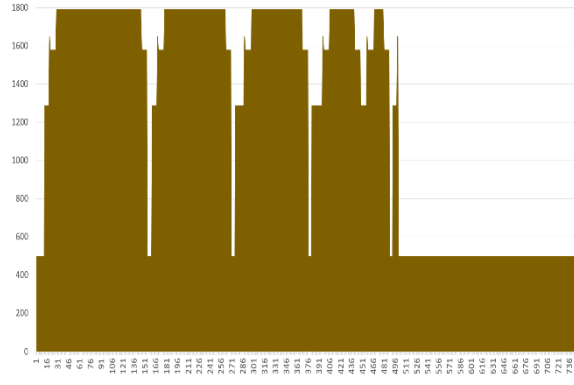
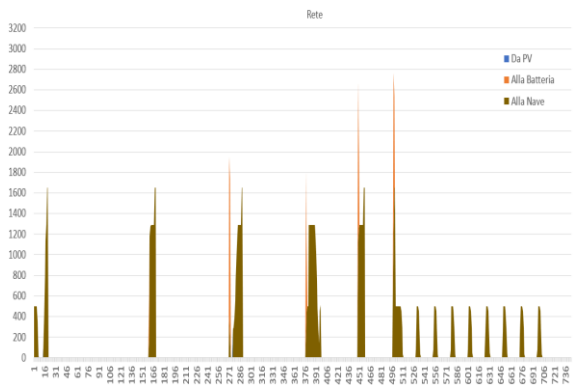
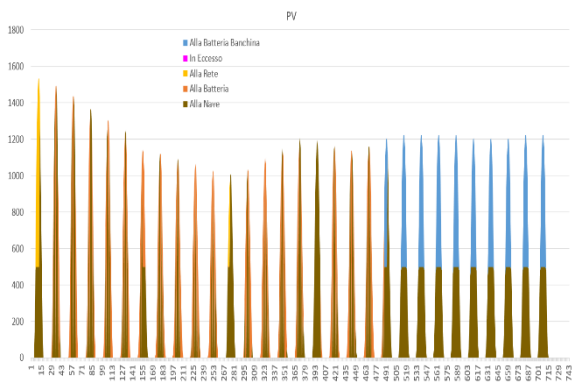
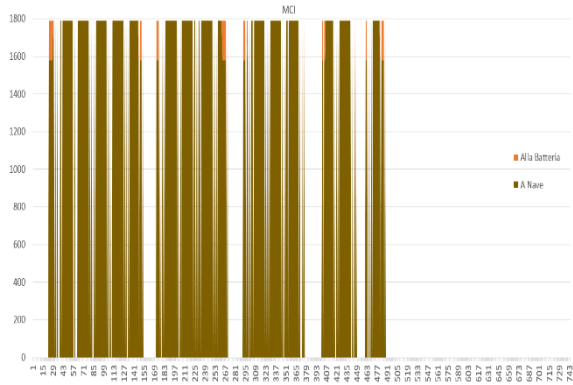


Configurazione 5 – Aprile [kW - ore]

Rendimento = 20%

Superficie = 8.000 m²

Capacità = 5.000 kWh

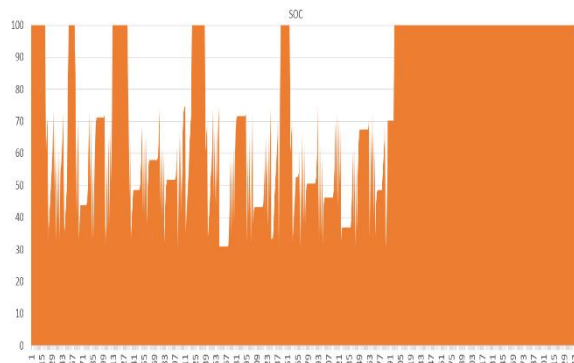
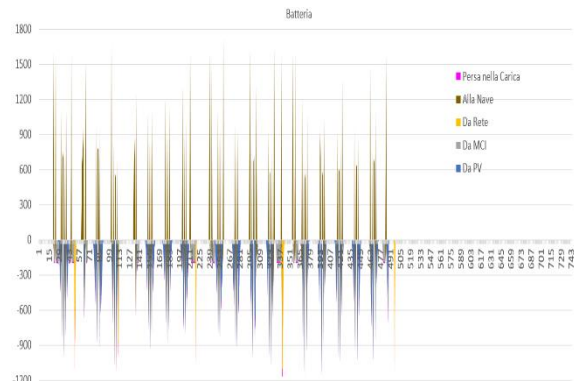
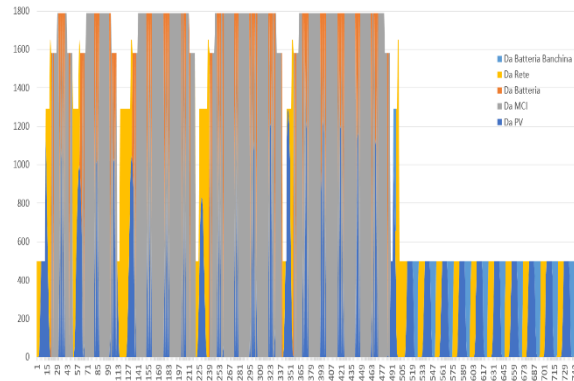
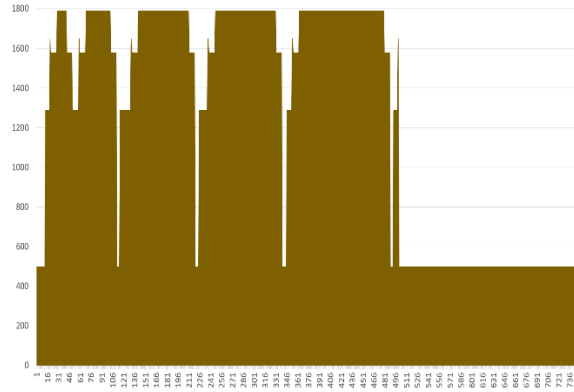
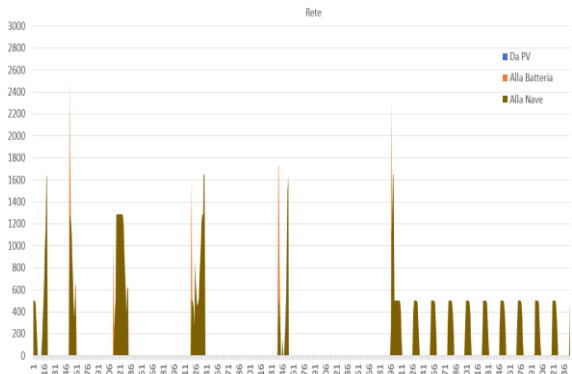
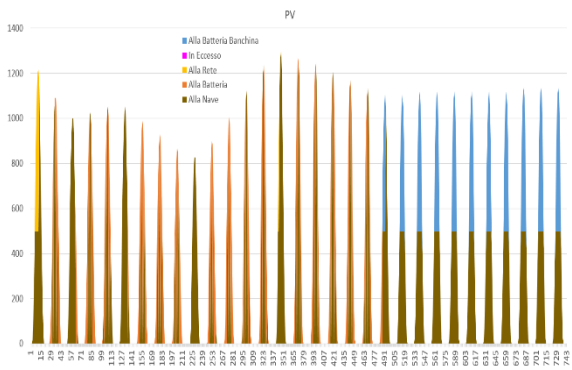
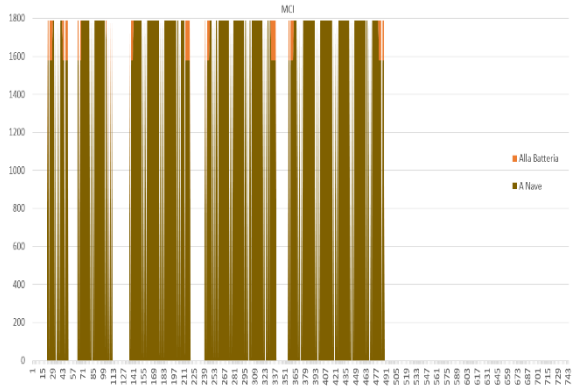


Configurazione 5 – Luglio [kW - ore]

Rendimento = 20%

Superficie = 8.000 m²

Capacità = 4.000 kWh

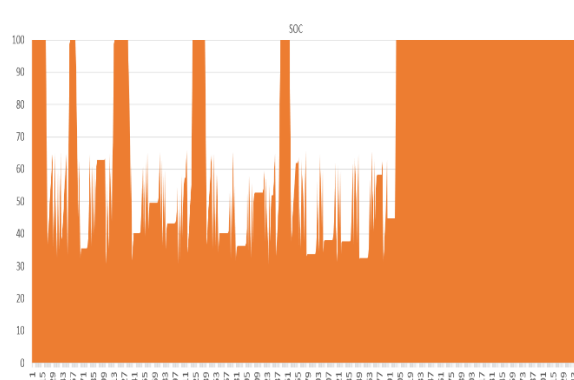
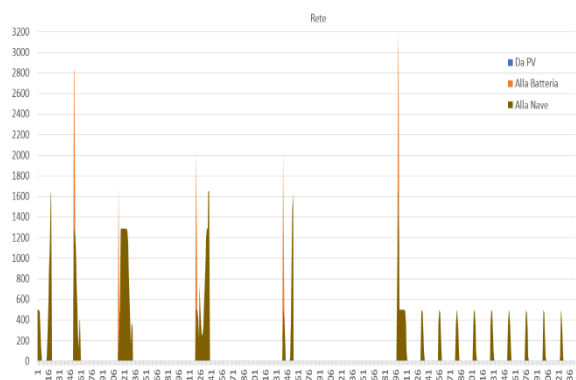
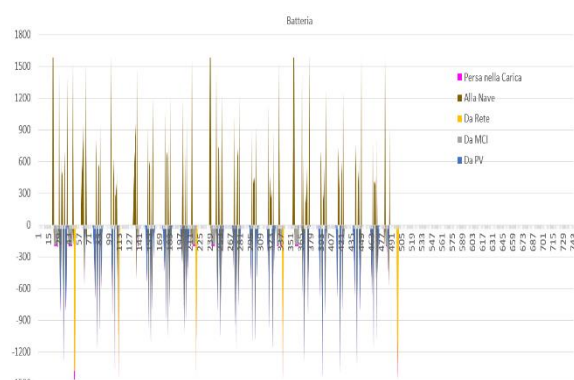
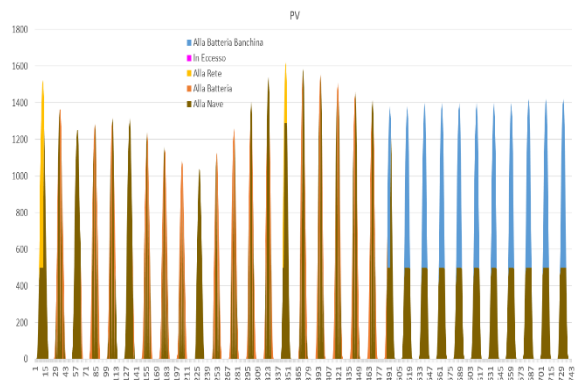
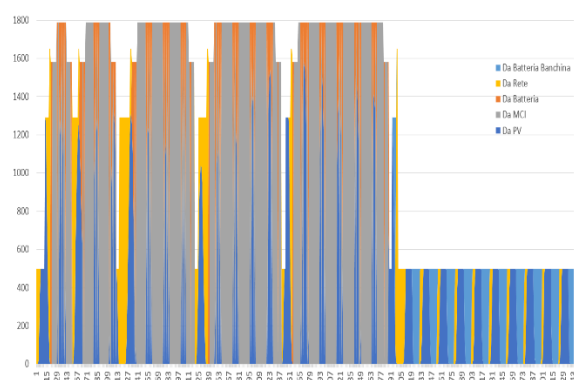
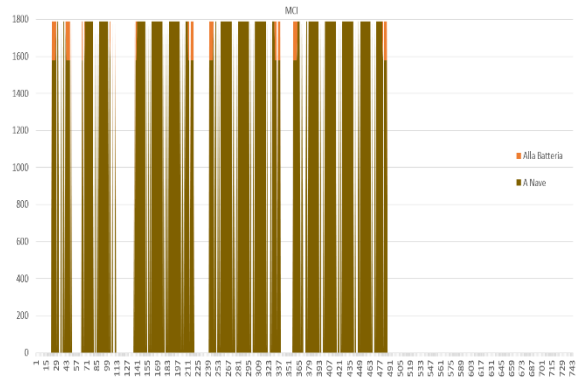
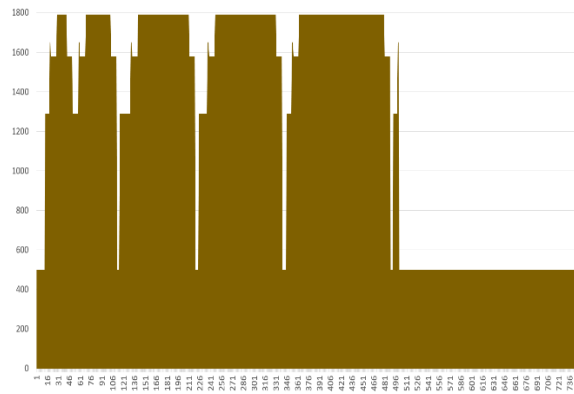


Configurazione 5 – Luglio [kW - ore]

Rendimento = 20%

Superficie = 10.000 m²

Capacità = 5.000 kWh

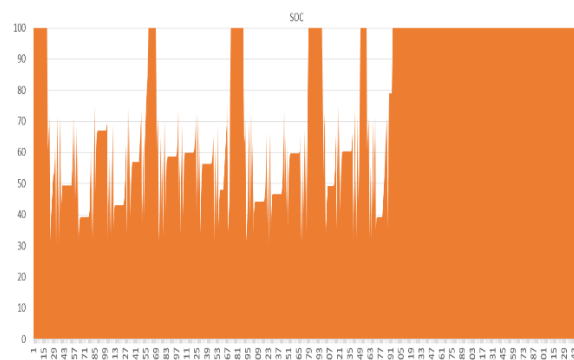
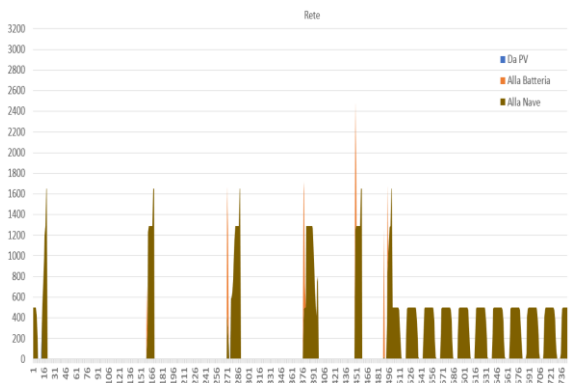
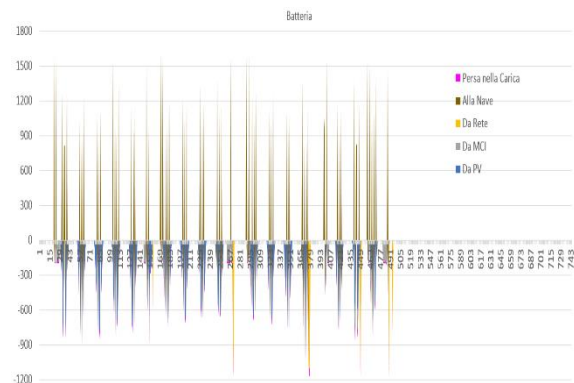
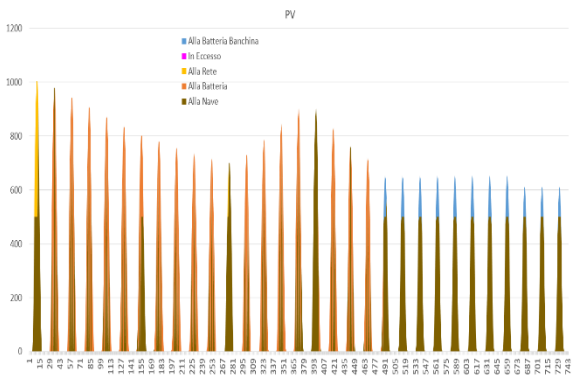
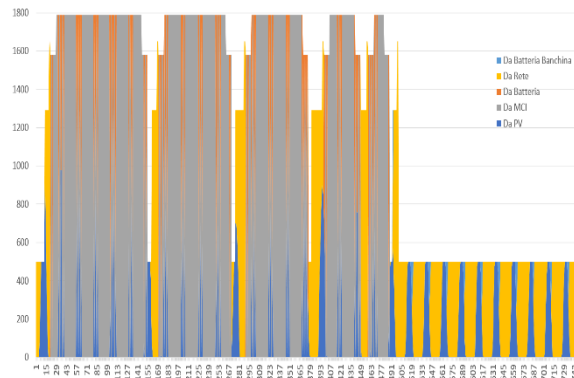
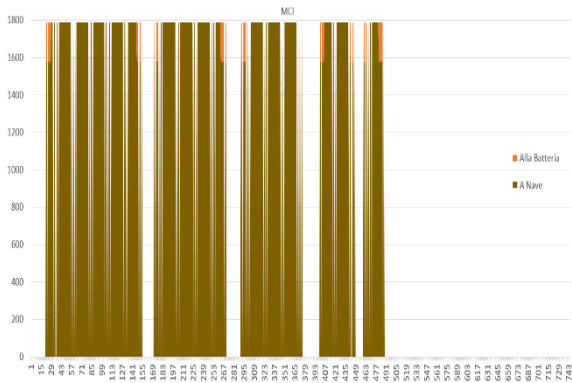
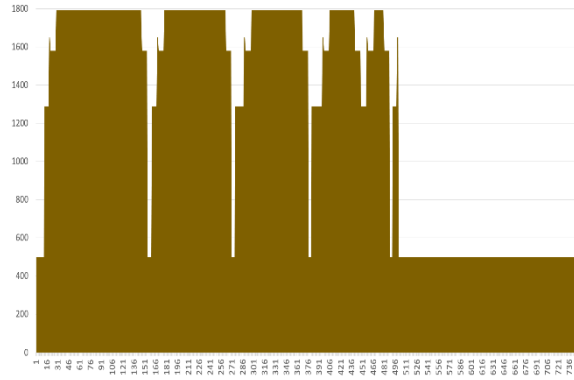


Configurazione 5 – Ottobre [kW - ore]

Rendimento = 20%

Superficie = 6.000 m²

Capacità = 4.000 kWh



Configurazione 5 – Ottobre [kW - ore]

Rendimento = 20%

Superficie = 8.000 m²

Capacità = 5.000 kWh

