



# UNIVERSITÀ DI PARMA

Dipartimento di Ingegneria e Architettura

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea in

## **CALIBRAZIONE DI MODELLI ENERGETICI DI MOTORI A INDUZIONE PER STIME SU CICLI DI LAVORO REALI**

---

### **CALIBRATION OF ENERGY MODELS OF INDUCTION MOTORS FOR ESTIMATION OVER REAL WORK CYLES**

Relatore:

Chiar.mo Prof. *Alessandro Soldati*

Laureando:

*Roberto Ravaglia*

Matricola:

308692

Sessione II

Anno Accademico 2021/2022

*Mi è doveroso dedicare questo spazio del mio elaborato alle persone che hanno contribuito,  
.con il loro instancabile supporto, alla realizzazione dello stesso*

*In primis, un ringraziamento speciale al mio professore Alessandro Soldati per la sua  
immensa pazienza, per i suoi indispensabili consigli, per le conoscenze trasmesse durante  
tutto il percorso di stesura dell'elaborato.*

*Un ringraziamento speciale va al mio Tutor Ferruccio, che mi ha aiutato a condurre le  
ricerche, oggetto dell'elaborato, presso l'azienda Valtaro Motori.*

*Ringrazio tutta la Valtaro Motori, in cui ho svolto un tirocinio formativo della durata di  
un paio di mesi e complementare alla redazione della tesi, per l'ospitalità e per le  
conoscenze acquisite sul campo.*

*Ringrazio infinitamente la mia famiglia, che mi ha sempre sostenuto, appoggiando ogni  
mia decisione, fin dalla scelta del mio percorso di studi. Senza il loro supporto morale, non  
sarei mai potuto arrivare fin qui. Grazie per esserci sempre stati soprattutto nei momenti  
di sconforto, grazie di starmi sempre vicino. Un grazie di cuore a mio fratello, che ha il  
potere di mettermi il sorriso ogni volta che passiamo del tempo insieme.*

*Un grazie di cuore ai miei colleghi e compagni di studio, diventati molto più che amici,  
con cui ho condiviso l'intero percorso universitario. È grazie a loro che ho superato i  
momenti più difficili.*

*Grazie ai miei amici per essere stati sempre presenti anche durante questa ultima fase del  
mio percorso di studi. Grazie per aver ascoltato i miei sfoghi, grazie per tutti i momenti di  
spensieratezza. Ringrazio ogni giorno di avervi al mio fianco.*

*Un ringraziamento speciale ad Anna. Grazie per tutto il tempo che mi hai dedicato.  
Grazie perché ci sei sempre stata.*

*Infine, dedico questa tesi a me stesso, ai miei sacrifici e alla mia costanza che mi hanno  
permesso di arrivare fin qui.*

## Sommario

INTRODUZIONE	4
1. CAPITOLO	5
I MOTORI ELETTRICI	5
Cenni Storici: energia elettrica e motori	5
Principali tipi di Motori Elettrici	7
Struttura e Descrizione	7
Funzionamento	9
Parametri di Progettazione	12
Parametri di Verifica	16
Disegni tipici di un motore elettrico	17
Valtaro Motori S.R.L.	18
2. CAPITOLO	19
VERIFICA DI UN MOTORE ASINCRONO	19
Sala Prove	19
Tipi di Prove Effettuate	22
Alta Efficienza	27
Esempio di prova a banco	30
3. CAPITOLO	33
SIMULAZIONE	33
Utilizzi della simulazione	33
Calcolo dei Parametri	33
Modelli Energetici	37
Validazione di Modelli Energetici	38
Stime su cicli di lavoro reali	39
4. CAPITOLO	45
ANALISI DEI RISULTATI & CONCLUSIONI	45
Risultati & Analisi dei Risultati	45
Uso nelle aziende	53
SITOGRAFIA	54
INDICE DELLE FIGURE	56
INDICE DELLE TABELLE	57

## INTRODUZIONE

Dai primi anni 2000 fino ad oggi, l'utilizzo dei motori elettrici è cresciuto sempre di più. Si possono trovare motori elettrici nelle più svariate applicazioni. L'utilizzo all'interno delle industrie rimane una delle applicazioni più comuni.

Alla base di questo studio vi è l'analisi delle prove a banco effettuate su motori elettrici destinati all'uso industriale, ponendo l'accento su come variano le prestazioni e i parametri fondamentali a seconda del carico e della tensione.

Le motivazioni che mi hanno spinto ad approfondire tale tema hanno una duplice natura. L'interesse nei confronti dei motori elettrici è stato influenzato e sicuramente incentivato dalle esperienze vissute durante il mio tirocinio universitario, che mi hanno permesso di entrare in contatto con una realtà con cui non avevo mai avuto a che fare. Dopo essermi documentato sugli studi condotti al riguardo e grazie a ciò che mi hanno insegnato in azienda, ho deciso di approfondire gli studi relativi ai modelli energetici di motori elettrici.

L'obiettivo di questa tesi di laurea è quello di fornire un'analisi accurata dei dati raccolti, mettendone in evidenza le peculiarità e confrontandoli tra loro. L'obiettivo, inoltre, è quello di utilizzare questi dati per sviluppare dei modelli energetici di motori a induzione che ricalchino le prestazioni reali di motori provati a banco. Tramite questi modelli, poi, sarà possibile prevedere l'efficienza di questi ultimi se sottoposti a cicli di lavoro reali.

Sono state condotte prove a banco durante il tirocinio, che interessavano motori elettrici da potenze di 0,18 fino a 10 kW. Le prove effettuate erano di diverso tipo: il motore veniva prima provato a vuoto, poi a carico, poi a potenza nominale per monitorarne il riscaldamento e infine venivano calcolate coppia massima e coppia e corrente di spunto. L'analisi dei dati raccolti è stata svolta comparando prima i risultati ottenuti a banco con quelli ottenuti tramite simulazione, poi confrontando i dati ottenuti tramite simulazione di un ciclo reale, con quelli di un servizio continuo S1.

La tesi è articolata in cinque capitoli: nel primo capitolo viene fornita un'introduzione ai motori elettrici, attraverso un excursus che riprende la loro storia e la loro invenzione. Nel secondo capitolo ci si occupa di sviluppare un resoconto delle prove effettuate in Valtaro Motori, fornendone alcuni esempi. Il terzo capitolo si focalizza sulla parte di sviluppo dei modelli energetici, sulla loro validazione e sul loro utilizzo nella stima di cicli reali, andando ad ottenere vari parametri differenti. Nel quarto capitolo, infine, si procede a commentare i risultati e i parametri ottenuti dall'analisi dell'elaborazione dei dati, esponendo gli elementi più rilevanti dell'indagine svolta.

Grazie a questo lavoro di ricerca è stato possibile analizzare alcuni importanti fattori legati alle variazioni di carico e di alimentazione, risultati che saranno esposti nelle conclusioni finali di questa tesi.

# 1. CAPITOLO

## I MOTORI ELETTRICI

### Cenni Storici: energia elettrica e motori

L'introduzione sempre più massiccia di auto elettriche nel mercato globale negli ultimi dieci anni ha portato a sentire parlare sempre di più di motori elettrici, ossia, come tutti ben sappiamo, quella macchina rotante che assorbe energia elettrica ed è in grado di trasformarla in energia meccanica. La scoperta del motore elettrico, però, non è assolutamente recente.

Il primo generatore statico di corrente continua della storia è dovuto ad Alessandro Volta che, nel 1799, inventò la pila di Volta, costituita da dischi successivi di metalli dissimili, come zinco e rame, separati da un conduttore costituito da cartone imbevuto di una soluzione salina. La sua invenzione deriva da studi precedenti svolti da Luigi Galvani, il quale scoprì qualche anno prima la relazione che vi è tra elettricità e vita, fenomeno che all'epoca prese il nome di Galvanismo. Successivi studi sono dovuti ad Ampère. Nel 1826, infatti, formulò il teorema di Ampère, legge di grande importanza nell'ambito dell'elettromagnetismo.

Gli studi più importanti in questo campo sono dovuti a Micheal Faraday, padre dell'elettromagnetismo. Nel 1821, dopo aver discusso con due importanti scienziati inglesi (Humpry Davy e William Wollastone) sulla progettazione di un motore elettrico, costruì due dispositivi per produrre quella che venne chiamata 'rotazione elettromagnetica', un moto circolare continuo causato dalla forza magnetica attorno ad un filo. Anni più tardi, tra il 1831 e il 1833, diede inizio ad una grande serie di esperimenti che portarono alla scoperta dell'induzione elettromagnetica. Altre dimostrazioni, successivamente, stabilirono che un campo magnetico variabile produce un campo elettrico. Questa relazione è espressa matematicamente dalla Legge di Faraday-Neumann-Lenz. Successivamente utilizzò questo principio per costruire la dinamo, antenato dei moderni generatori di corrente. Le sue scoperte sperimentali furono consolidate da James Clerk Maxwell, il quale sviluppò le equazioni che stanno alla base di tutte le moderne teorie sui fenomeni elettromagnetici.

Joseph Henry, fisico americano, contemporaneamente a Faraday, scoprì il fenomeno dell'autoinduzione nel 1832 ed elaborò anche uno dei primi modelli di motore elettrico.

Ad Antonio Pacinotti, invece, dobbiamo il primo generatore dinamo-elettrico di corrente continua sperimentale, costruito nel 1859. Il generatore è un derivato di una intuizione avuta precedentemente che prende il nome di Anello di Pacinotti.

Dopo Pacinotti, Galileo Ferraris, il padre della corrente trifase, scoprì, tra il 1885 e il 1888, il campo magnetico rotante, che aprì una nuova era nel campo dei motori elettrici, in particolare quelli in corrente alternata. Ferraris non si preoccupò di brevettare il modello e non ne evidenziò i possibili usi industriali.

Nel 1882, Thomas Edison, sfruttò generatori di corrente in continua per produrre energia elettrica, creando di fatto la prima centrale di energia elettrica nel mondo a New York. La corrente prodotta era ad un voltaggio di circa 120V e veniva trasportata tramite dei grossi cavi in rame alle città vicine. Il rame, come tutti i conduttori, oppone una certa resistenza al passaggio di corrente. Questo fenomeno portava la corrente a passare dai 120 Volt a cui veniva prodotta, fino ad arrivare alle abitazioni più lontane a 70-80-90 Volt a seconda della lunghezza dei cavi in rame. Questo problema portò a costruire le prime centrali vicino ai grandi centri abitati.

Qualche anno più tardi, Nikola Tesla, sfruttando gli studi di Galileo Ferraris, costruì con Westinghouse il primo modello di motore elettrico in corrente alternata per l'utilizzo industriale e, di conseguenza, il generatore in corrente alternata, tramite il quale poté produrre corrente elettrica alternata proprio come stava facendo Edison con la corrente continua.

Tesla si dovette scontrare con Edison per via delle loro teorie diverse: Tesla voleva sostituire i generatori DC con quelli di nuova generazione AC. La corrente alternata aveva la possibilità di essere trasformata in alta o bassa tensione grazie ai trasformatori. Poteva, quindi, essere generata corrente in centrale ad una certa tensione, la quale veniva poi elevata tramite l'utilizzo dei trasformatori. In questo modo la corrente poteva essere trasportata molto più lontano rispetto a quanto accadeva con la corrente in continua nelle centrali di Edison.

Tesla vinse il confronto con Edison e le centrali furono cambiate. Da lì in poi l'energia elettrica costituì il passo fondamentale per l'evoluzione industriale.

## Principali tipi di Motori Elettrici

Vengono divisi in tre grandi categorie a seconda dell'alimentazione: esistono, infatti, motori che necessitano di una alimentazione in corrente continua, altri in corrente alternata e altri ancora possono ricevere sia corrente continua che alternata, per questo detti "motori universali". I motori in corrente continua sono principalmente di tre tipi: tradizionale, passo-passo e brushless.

I motori elettrici in corrente alternata sono invece divisi in due gruppi: motori sincroni oppure asincroni.

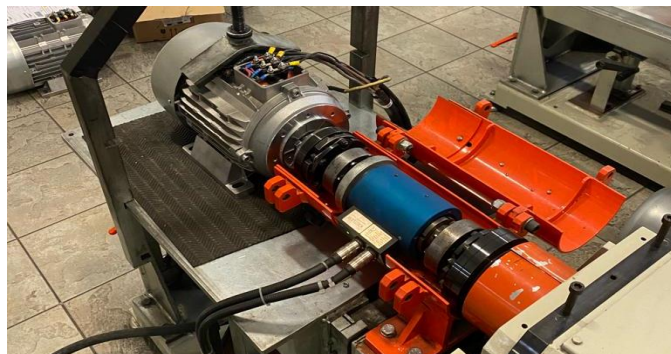
Un motore sincrono è un motore dove la velocità di rotazione è sincronizzata con la frequenza elettrica di alimentazione. Comunemente si tratta di motori con alimentazione trifase, anche se spesso si trovano anche motori, specie quelli di piccole dimensioni, alimentati tramite tensione monofase.

Un motore asincrono, invece, è un motore dove la velocità angolare del rotore è inferiore rispetto alla velocità di rotazione del campo magnetico generato dagli avvolgimenti dello statore, da cui l'asincronismo. Così come il motore sincrono, può essere usato come generatore di corrente alternata quando la velocità del rotore è maggiore rispetto a quella del campo magnetico generata. Esistono sia motori asincroni monofase che trifase.

In questa tesi ci si concentrerà principalmente sui motori asincroni trifase.

## Struttura e Descrizione

Il motore asincrono è un motore elettrico in corrente alternata in cui la velocità angolare del rotore è inferiore alla velocità di rotazione del campo magnetico generato dagli avvolgimenti dello statore.



*Figura 1: M63C2 durante prova a banco*

Il motore asincrono è anche detto motore a induzione. Quando, a causa di una forza esterna, il rotore ha una velocità superiore al campo rotante dello statore, il motore asincrono può essere utilizzato come generatore asincrono.

È utilizzato per piccole potenze, in occorrenze nelle quali si preferisce la facilità d'impiego rispetto al motore sincrono che richiede l'uso di inverter (o di un sistema di eccitazione del campo rotorico) anche a discapito del rendimento.

Tuttavia, il rendimento è in funzione della potenza massima e può arrivare fino a 0,97 per i motori più grandi.

Il suo uso pratico a livello industriale è dovuto a Nikola Tesla che, nel 1888, brevettò il sistema trifase, sulla base degli studi di Galileo Ferraris. Il motore asincrono, come ogni motore elettrico, è formato da una parte statica detta statore e da una parte mobile detta rotore. Lo statore è formato da un pacco di lamierini aventi la forma di corona circolare. I lamierini vengono impilati uno sopra l'altro. L'impacchettamento deve essere il più stretto possibile, poiché anche questo aspetto, come tanti altri che vedremo successivamente, ha un'influenza sul rendimento finale del motore. Le scanalature presenti sui lamierini statorici sono dette 'cave' e hanno la funzione di accogliere l'avvolgimento conduttore, che può essere bifase o trifase, formato solitamente da fili di rame smaltato (più raramente alluminio, a discapito del rendimento).

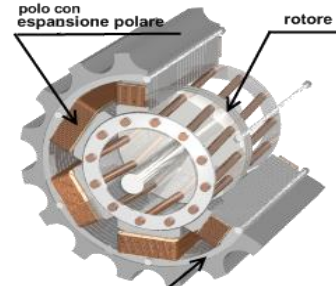


Figura 2: Schema 3D motore asincrono

Il rotore è situato all'interno dello statore ed è costituito da un pacco di lamierini aventi anch'essi la forma di corona circolare. Solitamente i lamierini di statore e rotore vengono stampati insieme.

Esso presenta un foro interno per il passaggio dell'albero e scanalature esterne (cave rotoriche), per accogliere l'avvolgimento rotorico. Quest'ultimo può essere di due tipi:

- Rotore avvolto (detto anche ad anelli);
- Rotore a gabbia di scoiattolo (detto anche in cortocircuito).

Tra statore e rotore è lasciato un piccolo spazio detto traferro (o airgap), per consentire la libera rotazione del rotore. Questo sottile spessore d'aria (che funge da dielettrico) è di qualche decimo di millimetro (solitamente intorno a 0.5-0.7 mm). Deve consentire il movimento libero del rotore anche in caso di eccentricità di quest'ultimo. Gli avvolgimenti statorici sono in genere inglobati in resine, che garantiscono anche un'ottima protezione dall'acqua e dagli agenti atmosferici.

Lo statore contiene un numero pari di avvolgimenti in quanto, normalmente, ce ne sono due per ciascuna fase di alimentazione. Un motore trifase avrà quindi come minimo sei avvolgimenti, cioè una coppia di poli per ogni fase. Un motore a due fasi avrà tipicamente quattro avvolgimenti. I due avvolgimenti di ciascuna coppia polare sono collegati in serie e disposti fisicamente l'uno di fronte all'altro. Nel caso del motore trifase classico a sei avvolgimenti le coppie polari presentano uno sfasamento di 120° fisici ed elettrici.



## Funzionamento

L'avvolgimento statorico è alimentato con una corrente alternata. La corrente genera un campo magnetico complessivo che ruota nello spazio con la stessa frequenza della corrente di alimentazione grazie alla disposizione delle coppie polari, sfasate tra loro. Questo campo magnetico è rotante e viene definito campo di statore. L'avvolgimento del rotore (dotato di un certo numero di fasi chiuse in corto circuito) si trova immerso in questo campo magnetico rotante. Siccome il rotore gira più lentamente del campo di statore, il flusso magnetico sotteso dall'avvolgimento di rotore varia. Dal campo magnetico rotante vengono indotte delle correnti nel rotore per induzione magnetica, fenomeno espresso dalla legge di Faraday. Queste correnti indotte, a loro volta, generano un campo magnetico rotorico, che si oppone alle variazioni di flusso. Quest'ultimo interagisce con il campo statorico, generando una coppia sull'avvolgimento rotorico che fa ruotare il rotore. Questa asserzione è in accordo alla legge di Lenz.

Il campo magnetico di statore ruota ad una velocità fissa  $n_s$  detta velocità di sincronismo e strettamente collegata alla frequenza di alimentazione  $f$ .

Le correnti indotte nel rotore producono un campo magnetico che ruota a velocità  $(n_s - n_r)$  rispetto al rotore. Quest'ultimo quale ruota a velocità  $n_r$  rispetto allo statore, ottenendo una velocità per il campo di rotore pari alla velocità  $n_s$  rispetto allo statore, risultando dunque sincro con il campo di statore.

La condizione di sincronismo tra i due campo magnetici assicura una produzione di coppia costante da parte del motore. La situazione in cui la velocità di rotore è uguale a quella di sincronismo, è una condizione limite in cui non vi sono forze elettromotrici. La coppia motrice è quindi nulla. Quando non si ha sincronismo, invece, l'interazione attraverso i relativi campi magnetici tra le correnti di rotore e quelle di statore produce una coppia netta. La velocità di rotazione del rotore  $n_r$  sarà quindi sempre leggermente inferiore di quella di sincronismo. La differenza è proporzionale alla coppia resistente del motore in rotazione.

Il legame tra velocità di sincronismo  $n_s$ , frequenza  $f$  di alimentazione e il numero  $p$  di poli (oppure  $p_c$  di coppie polari per fase) è espresso dalla relazione:

$$n_s = 120 * \frac{f}{p}$$

La velocità del rotore in condizioni nominali è sempre inferiore rispetto a quella di sincronismo di un 3-6%. Viene così definito lo scorrimento, che consente al motore di produrre coppia. Da questa formula che esprime lo scorrimento è possibile esprimere la velocità di rotazione effettiva del rotore:

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s}$$

dove  $s$  indica lo scorrimento,  $n_s$  la velocità al sincronismo e  $n_r$  è la velocità reale di rotazione del rotore.

Il valore dello scorrimento dipende dal carico effettivo che si ha rotore. Il carico non è mai pari a zero poiché sono sempre presenti fenomeni legati all'attrito tra le parti mobili e con l'aria, che fanno in modo che il rotore non possa ruotare alla velocità di sincronismo.

Gli avvolgimenti statorici trifase possono essere collegati a stella oppure a triangolo, il che permette di alimentare lo stesso motore con tensioni trifase di 400 e 230 V. In alcuni motori di potenza elevata si preferisce avviare a stella e poi passare ad un collegamento a triangolo, per mantenere le correnti di spunto basse.

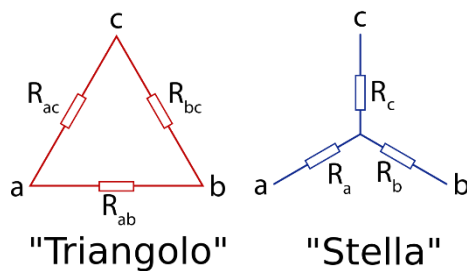


Figura 3: Schema Stella Triangolo

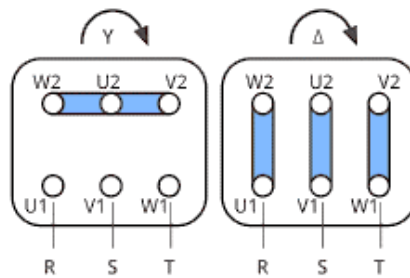


Figura 4: Schema Collegamento Morsettieri

I motori asincroni, quindi, operano normalmente con gli avvolgimenti di rotore chiusi in corto circuito. I tipi di rotore che possiamo trovare sono due:

- Rotore a Gabbia di Scoiattolo:

E' tipo più semplice di rotore e si realizza inserendo nei canali rotorici barre di rame o di alluminio, ciascuna delle quali riempie completamente un canale. Le testate delle barre che sporgono dal pacco rotorico vengono direttamente collegate fra loro da entrambe le parti mediante un grosso anello di rame (o alluminio). Il rotore così costruito prende la forma e viene indicato con il nome di rotore a gabbia di scoiattolo o in corto circuito.

Questi motori sono i più utilizzati nell'industria in quanto affidabili ed economici e saranno l'oggetto degli studi affrontati in questa tesi.

- Rotore Avvolto:

Questo tipo di motore è costituito da un pacco di corone circolari di lamiere magnetiche scanalate. L'avvolgimento viene costruito in maniera identica a quello di statore e i suoi terminali fanno capo a tre anelli coassiali con il rotore. Su questi anelli strisciano delle spazzole fisse collegate ai morsetti rotorici.

Storicamente i morsetti rotorici venivano collegati ad un reostato. Variando la resistenza elettrica del reostato si poteva aumentare la resistenza dei circuiti rotorici spostando la coppia massima verso lo scorrimento pari ad uno. In questa maniera in fase di avvio del motore la coppia di spunto diventa massima, riducendo anche le correnti assorbite allo spunto. Dopo la partenza del motore le resistenze reostatiche vanno scollegate dopo aver collegato in cortocircuito i circuiti del rotore.

Attualmente i motori asincroni a rotore avvolto sono utilizzati, insieme ad inverter, in generatori eolici.

## Parametri di Progettazione

Durante il tirocinio effettuato presso Valtaro Motori ho potuto apprendere come viene progettato un motore elettrico, seguendone i passaggi dalla A alla Z.

Come si diceva in precedenza, Valtaro Motori è una azienda che concentra la maggior parte del proprio lavoro sulla progettazione e sull'assemblaggio di motori customizzati. Si progetta un motore elettrico, dunque, a partire dalle specifiche richieste del cliente. Tale operazione è semplificata dalla presenza, sul sito dell'azienda, di un configuratore che lascia al cliente la possibilità di scegliere il proprio motore attraverso quattro parametri:

- Il tipo di motore: i motori fra cui ricade la scelta del cliente sono generalmente quattro: motori trifase, monofase, doppia polarità e auto-frenanti; dopodiché, tra le caratteristiche primarie definite dal cliente, abbiamo la potenza, fondamentale per andare a dimensionare ogni componente all'interno del motore.
- La serie di appartenenza: la scelta comprende diverse tipologie. Nel caso, ad esempio, del motore trifase, abbiamo la serie M, che comprende tutti i motori standard, la serie DP, che interessa i motori a doppia polarità, la serie MAF, che comprende tutti i motori auto frenanti, la serie MHE2 e la serie MHE3, che comprendono rispettivamente motori che rispettano le normative IE2 e IE3.  
  
Si hanno diverse serie anche per quanto riguarda i motori monofase, come, ad esempio, MM, MMB, MMK.
- Numero di Poli: il numero di poli, insieme alla frequenza di alimentazione, definisce quella che è la velocità di rotazione del motore, più precisamente la velocità di sincronismo.
- Potenza: l'ultimo parametro fondamentale per definire un motore elettrico è sicuramente la potenza meccanica trasmissibile all'albero.

Le richieste possono interessare anche la parte esterna del motore.

Per quanto riguarda l'industria alimentare, ad esempio, le carcasse devono essere prive di alette di raffreddamento e lucidate a specchio, per evitare l'accumularsi di sporcizia intorno al motore.

I motori custom di Valtaro Motori vengono prodotti anche per sistemi car-lift e home-lift, per applicazioni ad alte temperature e anche in bagno d'olio.

A partire da questi parametri l'azienda propone varie soluzioni, che possono essere realizzate direttamente in fabbrica se si tratta di motori standard, o possono essere interpretati per fornire una soluzione ottimale al cliente nel caso di motori custom.

Dopo aver ricevuto l'ordine, nel caso di un motore custom, si procede alla progettazione.

I componenti su cui si agisce per fornire il miglior compromesso tra rendimento e assorbimento e potenza, sono l'avvolgimento di statore, la forma e il numero delle cave di rotore e statore, il materiale dell'avvolgimento e la lunghezza del pacco statorico e rotorico.

In generale, un motore viene sempre progettato confrontandolo con motori precedentemente progettati con successo e con caratteristiche simili, in modo da evitare ogni possibile errore nello sviluppo.

Viene poi redatta una scheda che contiene ogni informazione necessaria all'operatore che andrà ad assemblare il motore elettrico.

Le specifiche di progetto, per un motore asincrono, sono:

- |   |       |            |                 |                |
|---|-------|------------|-----------------|----------------|
| 1. <u>Numero di Fasi</u>  | m     |            |                 |                |
| 2. <u>Potenza Nominale</u><br>all'albero                              | $P_n$ | [W]        | Potenza         | meccanica resa |
| 3. <u>Tensione Nominale</u><br>alimentazione, concatenata se polifase | $V_n$ | [V]        | Valore efficace | tensione di    |
| 4. <u>Frequenza di Statore</u>  | $f$   | [Hz]       | Frequenza di    | alimentazione  |
| 5. <u>N° Poli</u>   | p     |            |                 |                |
| 6. <u>Velocità Nominale</u>   | $n_s$ | [giri/min] |                 |                |

Oppure

- |                                   |                             |
|-----------------------------------|-----------------------------|
| <u>Scorrimento Nominale</u>       | s                           |
| 7. <u>Collegamento delle Fasi</u> | stella/triangolo o entrambi |
| 8. <u>Tipo di Servizio</u>        |                             |

- |   |  |
|---|--|
| S1: continuo  | S7: ininterrotto periodico con frenatura elettrica             |
| S2: di durata limitata                              |  |
| S3: intermittente periodico                         | S8: ininterrotto periodico con variazioni di carico e velocità |
| S4: intermittente periodico con avviamento          | S9: con variazioni non periodiche di carico e velocità         |
| S5: intermittente periodico con frenatura elettrica | S10: con carichi distinti e costanti                           |
| S6: ininterrotto periodico                          |  |

## 9. Raffreddamento:

Per potenze medio-basse si hanno motori auto-ventilati (ventole calettate sull'albero). All'aumentare della potenza, il raffreddamento può essere ad aria fornita da ventilatori esterni oppure con scambiatori di calore aria-aria o aria-acqua.



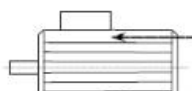
IC 411 Std	<p>Motore autoventilato Macchina chiusa, alettata esternamente. Ventola esterna montata sull'albero del motore.</p> <p><i>Self ventilating motor. Enclosed machine. Externally finned. External shaft-mounted fan.</i></p>	
IC 416 Su richiesta On request	<p>Motore con ventilazione assistita. Macchina chiusa, alettata esternamente. Ventilatore indipendente montato sotto copriventola.</p> <p><i>Motor with assisted ventilation. Enclosed machine. Externally finned. Independent external fan mounted inside the fan cover.</i></p>	
IC 418 Su richiesta <sup>1)</sup> On request	<p>Motore con ventilazione esterna. Macchina chiusa, alettata esternamente. Raffreddamento assicurato da un dispositivo non montato sul motore.</p> <p><i>Motor with external ventilation. Enclosed machine. Externally finned. Ventilation provided by air flowing from the driven system.</i></p>	

Figura 5: Tipi di Ventilazione

Il metodo di raffreddamento (IEC 60034-6, CEI 2-7) è classificato da una sigla che inizia con IC e prosegue con varie combinazioni di lettere e numeri, come riportato nella seguente tabella:

GRADO DI PROTEZIONE <i>Protection degrees</i>	CODICE IC <i>IC CODE</i>	DESCRIZIONE <i>Description</i>
IP23 S	IC01	Motore Autoventilato con raffreddamento ad aria <i>Self-ventilated by air</i>
IP23S	IC06	Ventilazione indipendente ventilatore montato assialmente <i>Independent cooling Independent external fan fixed axial of the motor</i>
IP23S	IC06	Ventilazione indipendente ventilatore posto superiormente al motore <i>Independent cooling Independent external fan fixet on the top of the motor</i>
IP54 (IP55 )	IC31	Autoventilato con bocche di ventilazione <i>Self ventilated by ducts</i>
IP54 (IP55)	IC37	Ventilazione indipendente con canali di ventilazione <i>Independent cooling by ducts</i>
IP54 (IP 55)	IC 01 61	Ventilazione indipendente con scambiatore aria-aria <i>Independent cooling with air-air heat-exchanger</i>
IP54 (IP 55)	IC W81	Ventilazione indipendente con scambiatore aria-acqua <i>Indipendent cooling with air-water heat exchanger</i>

Figura 6: Classificazione Metodi di Raffreddamento

## 10. Grado di Protezione:

Indicato con una sigla che inizia con le lettere IP a cui seguono due cifre: la prima definisce il grado di protezione delle persone contro i contatti con le parti in tensione o in movimento e il grado di protezione contro la penetrazione dei corpi solidi, la seconda il grado di protezione contro la penetrazione dannosa dell'acqua.

### 1<sup>a</sup> CIFRA: protezione contro il contatto di corpi solidi esterni e contro l'accesso a parti pericolose

cifra	Protezione del materiale protezione delle persone
0	Non protetto
1	Protetto contro corpi solidi di dimensioni superiori a 50 mm. Protetto contro l'accesso con il dorso della mano
2	Protetto contro corpi solidi di dimensioni superiori a 12 mm. Protetto contro l'accesso con un dito
3	Protetto contro corpi solidi di dimensioni superiori a 2,5 mm. Protetto contro l'accesso con un attrezzo
4	Protetto contro corpi solidi di dimensioni superiori a 1 mm. Protetto contro l'accesso con un filo
5	Protetto contro la polvere e protetto contro l'accesso con un filo
6	Totalmente protetto contro la polvere protetto contro l'accesso con un filo

Figura 7: Descrizione Prima Cifra codifica IP

### 2<sup>a</sup> CIFRA: protezione contro la penetrazione dei liquidi

cifra	Protezione del materiale
0	Non protetto
1	Protetto contro la caduta verticale di gocce d'acqua
2	Protetto contro la caduta di gocce d'acqua con inclinazione max di 15°
3	Protetto contro la pioggia
4	Protetto contro gli spruzzi d'acqua
5	Protetto contro i getti d'acqua
6	Protetto contro le ondate
7	Protetto contro gli effetti dell'immersione
8	Protetto contro gli effetti della sommersione

Figura 8: Descrizione Prima Cifra codifica IP

## 11. Direzione dell'asse durante il funzionamento: orizzontale o verticale (influenza la scelta del metodo di raffreddamento e dei cuscinetti).

Altra caratteristica di progettazione molto importante è il rapporto L/D, ossia il rapporto tra la lunghezza e il diametro dello statore.

Per la scelta del rapporto L/D (L = lunghezza nucleo di statore, D = diametro interno statore) si può usare una tabella che fornisce i valori minimi e massimi di questo rapporto in funzione del numero di poli.

n° poli $p$	$L/D$
2	0,80÷1,60
4	0,55÷1,20
6	0,50÷0,95
8	0,45÷0,80

Figura 9: Correlazione tra numero di poli/rapporto L/D

In generale, all'aumentare del numero dei poli, diminuisce il rapporto L/D, perché il diametro deve aumentare per permettere la distribuzione degli avvolgimenti a più polarità.

A parità di numero di poli, valori più bassi del rapporto L/D corrispondono ad un miglior raffreddamento della macchina, ad un più semplice dimensionamento del rotore, ma ad un costo generalmente superiore. Viene anche definito il numero di cave di rotore e statore, scelto generalmente tra questi valori.

Numero di poli	Cave di statore $Q_1$	Cave di rotore $Q_2$
2	18	25 – 26
	24	16 – 28 – 30 – 32
	36	24 – 30 – 42 – 46
4	24	18 – 30 – 34
	36	26 – 30 – 42 – 46
	48	30 – 40 – 58 – 62
6	36	26 – 28 – 46
	54	38 – 40 – 64 – 68 – 70
	72	52 – 56 – 58 – 92 – 94
8	48	34 – 36 – 38 – 60
	72	54 – 58 – 86 – 90 – 96

Figura 10: Correlazione tra numero di poli e cave rotore/statore

## Parametri di Verifica

Abbiamo, inoltre, tutta una serie di parametri da utilizzare come verifica del progetto. I parametri sono i seguenti:

- Rapporto tra coppia di spunto e coppia nominale  $C_{avv}/C_n$
- Rapporto tra coppia massima e coppia nominale  $C_{max}/C_n$
- Rendimento in condizioni nominali  $\eta$
- Fattore di potenza in condizioni nominali  $\varphi$

Dove la coppia nominale  $C_n$  è definita come  $C_n = P_n/\omega_m$

e la velocità angolare  $\omega_m$  è definita come  $\omega_m = 2\pi \cdot n_n/60$ .

I valori tipici di  $C_{max}/C_n$  si aggirano tra valori compresi tra 1,6 e 4.

Per quanto riguarda lo scorrimento nominale definito in precedenza, nella tabella sottostante troviamo alcuni dei valori tipici in base alla potenza erogata:

$P_n$ [kW]	$s_n$
0,5	0,07÷0,10
1	0,06÷0,08
5	0,04÷0,05
25	0,03÷0,04
100	0,02÷0,03
500	0,015÷0,018

Figura 11: Correlazione tra Potenza e Scorrimento

Il fattore di potenza  $\cos(\varphi)$  può variare tra 0,7 e 0,9, con valori più alti per un numero di poli  $p$  basso (motori più veloci).

Si osserva che il fattore di potenza nei motori asincroni si riduce all'aumentare del numero di poli per i seguenti motivi:

A parità di altre condizioni (potenza, tensione, frequenza, induzione al traferro), per un numero di poli superiore il flusso magnetico attraversa il traferro più volte. Di conseguenza, a parità di flusso per polo, è richiesta una maggiore corrente magnetizzante perché è maggiore la riluttanza del percorso del flusso magnetico. Ad un aumento della corrente magnetizzante (essenzialmente di tipo reattivo) corrisponde una diminuzione del fattore di potenza<sup>1</sup>.

Complessivamente, all'aumentare del numero dei poli, aumenta la corrente magnetizzante e diminuisce il  $\cos\varphi$ .

---

<sup>1</sup> In realtà la questione è più complicata, perché la scelta progettuale prevede che, per un numero maggiore di poli, si scelga un valore di flusso inferiore. Tuttavia, se i poli di un motore passano, ad esempio, da 2 a 4, il Power Factor diminuisce.



## Disegni tipici di un motore elettrico

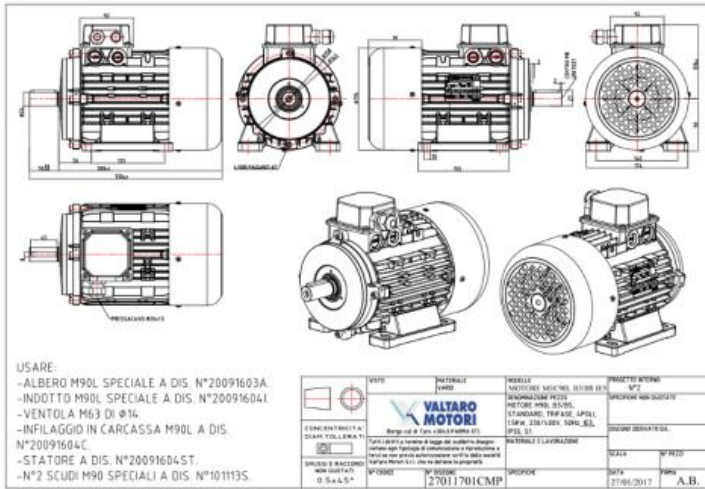


Fig. 1.12

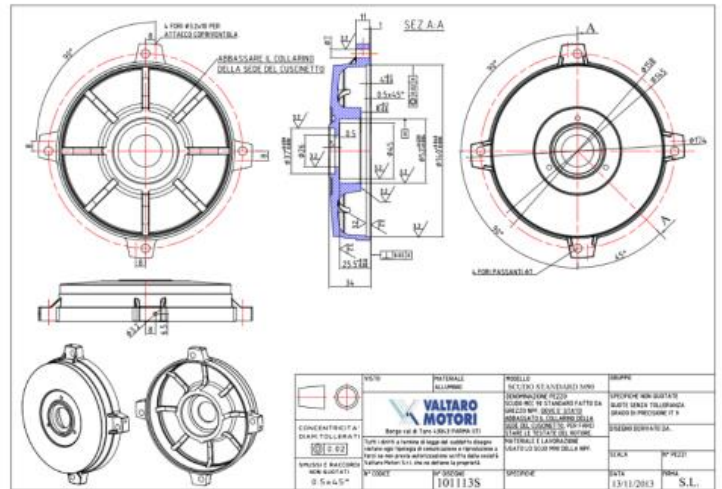


Fig. 1.13

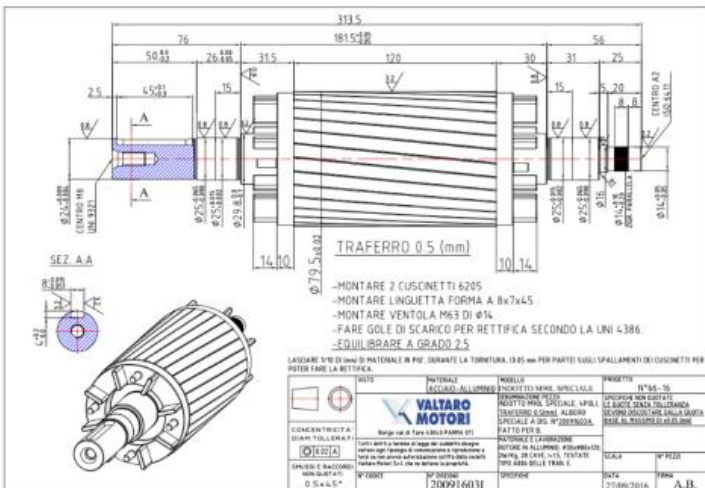


Fig. 1.14

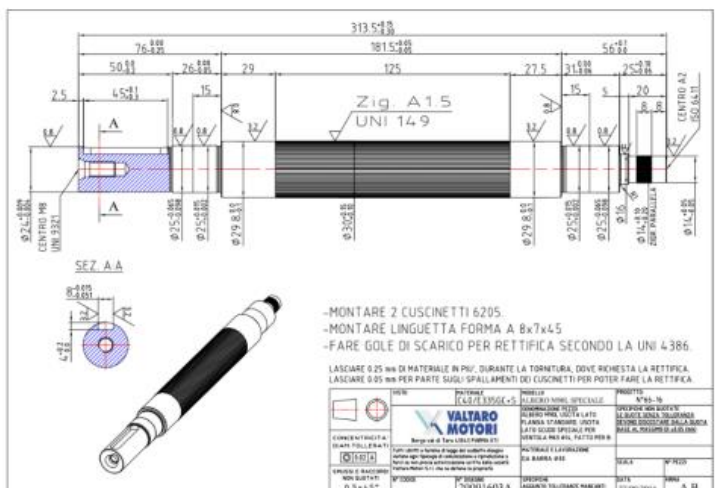


Fig. 1.15

Disegni Tipici Motore Asincrono

## Valtaro Motori S.R.L.



*Figura 12: Stabilimento Valtaro Motori*

Valtaro Motori S.R.L., grazie ad un'esperienza pluriennale maturata nel settore elettromeccanico, progetta e produce Motori Elettrici Asincroni. La produzione, perlopiù customizzata, permette all'azienda di proporre sul mercato un'ampia gamma di prodotti utili ai più svariati settori, da quello delle macchine per il trattamento degli alimenti a quello delle macchine per il vuoto e utensili, dalla stireria industriale alle attrezzature per autofficine, dalle macchine agricole a quelle del settore oleodinamico.

Valtaro Motori S.R.L. è ormai una realtà produttiva che anno dopo anno cresce costantemente grazie all'alta qualificazione e professionalità del personale, allo sviluppo di nuove tecnologie e all'attrezzatura sempre all'avanguardia.

L'obiettivo dell'Azienda è infatti quello di soddisfare a pieno ogni esigenza del cliente fornendo sempre un prodotto affidabile, di estrema qualità e 100% Made in Italy. A testimonianza di ciò vi è la certificazione ISO 9001:2008 e la sua revisione 2015. Da sottolineare anche la conformità che ogni Motore presenta rispetto alle direttive europee (marchio CE), alla normativa internazionale IEC34, alla direttiva per la bassa tensione (2014/35/UE) e alla direttiva per la compatibilità elettromagnetica (EMC 2014/30/UE).

Valtaro Motori, inoltre, possiede una completa sala prove dove poter effettuare tutte quelle verifiche tipiche che vengono effettuate solitamente su un motore ad induzione. È qui che si è concentrata la gran parte dell'attività.

## 2. CAPITOLO

### VERIFICA DI UN MOTORE ASINCRONO

#### Sala Prove

La sala prove è dotata di tre banchi prova: due di questi sono banchi torsiometrici, mentre il banco prova di taglia inferiore è un banco prova con freno classico. Il banco prova è uno strumento di misura, progettato per determinare le caratteristiche meccaniche dei motori, la loro potenza, la coppia motrice e la potenza assorbita. I grandi vantaggi portati da questo tipo di attrezzatura è la versatilità e la possibilità di effettuare test in condizioni variabili al fine di individuare le caratteristiche nei diversi regimi di funzionamento.

Per essere testato, il motore elettrico deve essere dapprima posizionato sul banco e l'albero motore viene fissato tramite una flangia al torsiometro del banco prova. Dopodiché viene fissata la carcassa al piano del banco in modo che il motore vibri il meno possibile e le misure siano quanto più accurate possibile.

Il collegamento alla rete di alimentazione avviene seguendo due configurazioni principali, una definita a stella e una a triangolo.

In un collegamento a stella, la corrente di linea è uguale alla corrente di fase, mentre in collegamento a triangolo la corrente di linea è uguale a radice di tre volte la corrente di fase. La corrente assorbita nel collegamento a triangolo è 3 volte quella assorbita nel collegamento a stella. Di conseguenza anche la coppia motrice è 3 volte maggiore.

Entrambi i collegamenti prendono il nome dalle figure che formano quando vengono schematizzati. Le fasi vengono prelevate dai punti a,b,c.

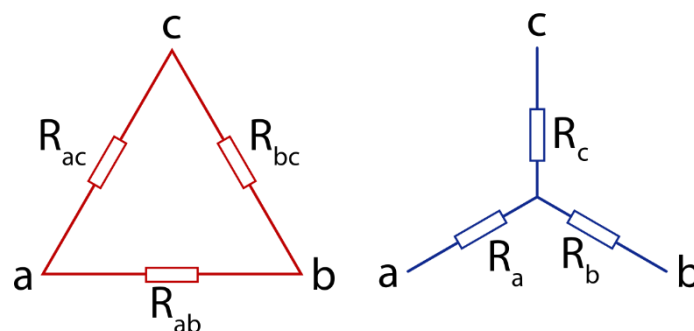


Figura 13: Schema Collegamento Stella Triangolo

In genere sulle macchine è presente una morsettiera, in cui è possibile configurare il circuito per mezzo di ponticelli, in modo da adattare il funzionamento a tensioni concatenate, solitamente, di 400 oppure 230 volt.

In alcuni motori asincroni trifase con elevati valori di potenza, progettati per funzionare con gli avvolgimenti collegati a triangolo, è possibile effettuare l'avviamento stella-triangolo. L'avviamento stella triangolo è uno dei più famosi metodi di avviamento a tensione ridotta. Esso serve ad avviare il motore riducendo le sollecitazioni meccaniche e limitando le correnti durante l'avviamento. Ha come difetto di rendere disponibile una coppia di spunto contenuta.

Dopo aver collegato il motore alla rete di alimentazione, vengono collegate delle sonde al motore, necessarie per capire come il motore reagisce ai carichi dal punto di vista termico. Vengono utilizzate due sonde, una per tenere sotto controllo la temperatura di avvolgimento, che non deve superare precisi valori definiti dalla classe di isolamento, e un'altra sonda che tiene sotto controllo la temperatura sulla carcassa, necessaria per far sì che il motore non vada a riscaldare eccessivamente l'ambiente circostante.

Le classi di isolamento che valgono per tutti i motori elettrici sono: C, H, F, B, E, a cui corrispondono intervalli di temperatura indicati nello schema qui di seguito.

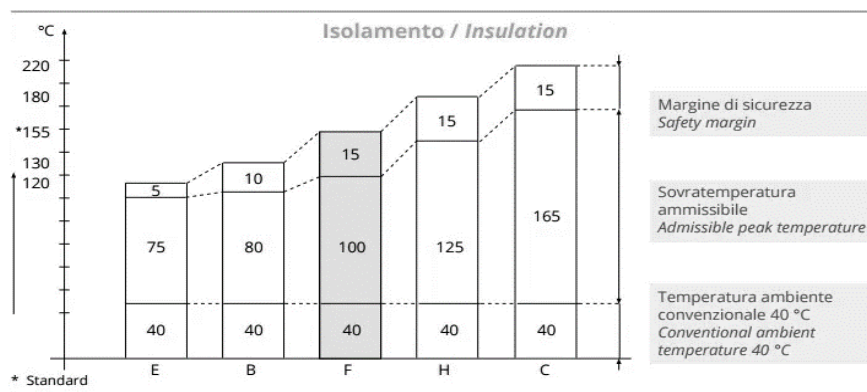


Figura 14: Classi di Isolamento

I motori elettrici classe H corrispondono a tipologie di utilizzo ad alte temperature. La classe di isolamento di un motore elettrico viene stabilita in primis dalla qualità dell'isolamento degli avvolgimenti. Gli avvolgimenti dei motori elettrici sono normalmente isolati tra di loro da speciali resine al fine di evitare cortocircuiti e dispersioni di corrente. Questo tipo di resine garantisce un regolare funzionamento corretto del motore fino al raggiungimento di una certa temperatura.

La classe di isolamento di un motore elettrico è sempre indicata nei dati di targa dalla lettera che indica la classe di appartenenza.

La classe più utilizzata per la maggior parte delle applicazioni e dei macchinari, è F. Spesso risulta necessario usare motori elettrici in classe H (motori Classe H).

Il motore elettrico Classe H è definito anche “motore per alte temperature”; lo scopo dell’isolamento in Classe H, infatti, è quello di proteggere i vari componenti del motore elettrico da danni causati dal surriscaldamento per funzionamento in ambienti con temperature elevate.

I motori elettrici Classe H sono costruiti utilizzando, oltre alla speciale resina dedicata, componenti in metallo, anelli di tenuta in viton e cuscinetti C3 con grasso speciale, che può sopportare temperature da -30 °C fino a +140 °C.

La temperatura ambiente convenzionale, in ambito motori elettrici, è stabilita in 40°C; la sovratemperatura ammissibile (cioè la temperatura extra ai 40°) per i motori elettrici Classe H è di altri 125°C con un margine di sicurezza di ulteriori 15°C. La temperatura massima ammessa è quindi di 180°C per motori elettrici Classe H considerando il margine di sicurezza.

Viene poi settata la frequenza di alimentazione, che principalmente è 50 Hz ma all’occorrenza può essere anche 60 Hz, viene selezionato sull’inverter il banco a cui collegarlo per cominciare la prova e viene collegato anche il Resistance Meter.

Dopo aver collegato il motore, viene redatta una scheda tecnica contenente informazioni in grado di descrivere il motore che si andrà a provare. Viene inoltre identificato con una matricola che lo definisce in modo univoco. Un esempio di questa scheda tecnica è riportato in seguito.

### PROVA MOTORE ASINCRONO TRIFASE

FILE:	M90L4-KW1,5-V230/400-50HZ-IE3	5227D13B001ZPSE	DATA:	22/11/2016	CLIENTE	BUCHER	
ORDINE N°	05261-41112	TIPO MOTORE	M90L4 IE3	MATRICOLA	UXGS13B000231M	ALIMENTAZIONE	TRIFASE
FREQUENZA [Hz]	50	V NOM STELLA	400	V NOM TRIANG.	230	COSFI	
I NOM STELLA		I NOM TRIANG.		GIRI [rpm]		RENDIMENTO %	
POT. ASS. [KW]		POTENZA [KW]	1,5	POLI	4	CLASSE ISOLAM.	F
GRADO PROTEZ.	54	SERVIZIO	S1	PESO Kg.		DIAM. EST. STAT.	135
DIAM. INT. STAT.	80	ALTEZZA STAT.	135	N° CAVE STAT.	36	DIAM. ROTORE	80
H ROTORE	135	CAVE ROTORE	28	PRESSOFUSO IN	ALLUMINIO	H CORONE	
INCLINAZ. CAVE	1,5	TRAFERRO mm	-0,5	DIAM. ASSE ROT.		AVVOLGIMENTO	
MAT. CAVA POL1	1	FILI CAVA POL1	39	DIAM.RAME POL1	0,71+0,71	PASSO POL1	1/8/10/12
SEZ. POL1 mm2		COLLEGAM. POL1		FILI PARAL. POL1		DIAM.RAME POL2	
COLLEG. POL2		AVVOLGIM. POL2		MAT. CAVA POL2		FILI CAVA POL2	
DIAM.RAME POL2		PASSO POL2		SEZ. POL2 mm2		FILI PARAL. POL2	

M90L4 KW1,5 V230/400-50HZ POLI 4 S1 IE3 BUCHER PROVA A V400-50HZ KW 1,5

Figura 15: Scheda Raccolta Dati Motore Asincrono



## Tipi di Prove Effettuate

Dopo aver rilevato il valore della resistenza a freddo, il programma ci chiede di selezionare la prova che vogliamo andare ad effettuare, scegliendo tra le prove presenti in questo riquadro:

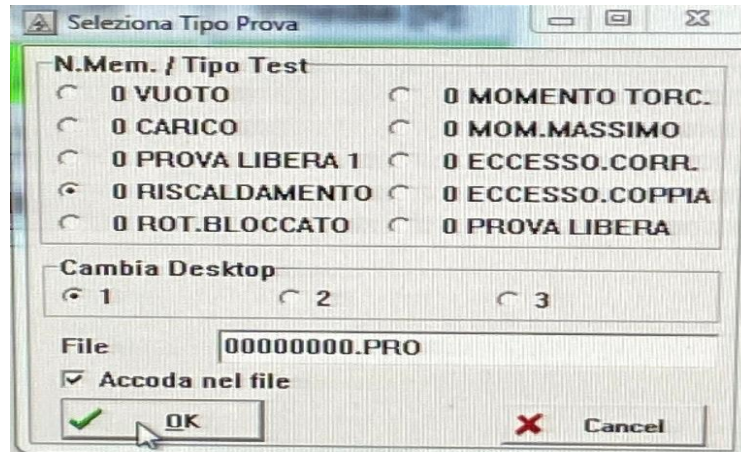


Figura 16: Selezione Tipo di Prove Win500032

La prima misura rilevata è relativa al valore della resistenza a freddo. Viene rilevata attraverso l'utilizzo del Resistance Meter.

Coincide, nel nostro caso, con la resistenza pura di statore  $R_s$ , parametro fondamentale insieme alla resistenza di rotore e le varie induttanze, per definire le prestazioni di un motore a induzione.

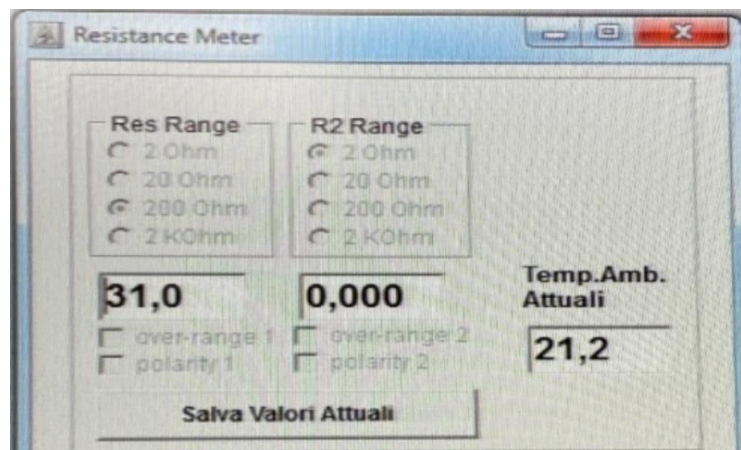


Figura 17: Misura Resistenza Resistance Meter

- Prova a Vuoto

La prova a vuoto si effettua generalmente alimentando il motore alla tensione nominale  $V_n$  senza applicare nessun carico all'albero. Il motore a vuoto possiede una velocità di rotazione prossima alla velocità di sincronismo, con uno scorrimento quasi nullo. I parametri che si ricavano da questa prova sono: corrente assorbita da ogni fase, corrente media, potenza assorbita, potenza apparente, fattore di potenza  $\cos(\varphi)$  e resistenza di statore influenzata dal riscaldamento del motore.

Ruotando a vuoto alimentato a tensione nominale, il motore richiederà dalla rete la potenza necessaria alle perdite nel ferro per isteresi e correnti parassite. Un motore asincrono in rotazione libera però, non può essere considerato rigorosamente a vuoto perché il motore è chiamato a sviluppare una potenza tale da soddisfare le perdite meccaniche per attrito e ventilazione. Tali perdite in realtà costituiscono un carico, che non permette al motore di girare alla velocità di sincronismo.

La potenza dissipata nel rame di statore non può essere trascurata e va computata nella potenza assorbita, mentre le perdite nel rame di rotore invece sono trascurabili, data l'esiguità della corrente di rotore. In conclusione, un motore a vuoto assorbe una potenza corrispondente alla somma delle perdite nel ferro e delle perdite nel rame a vuoto di statore:

$$P = P_m + P_f + P_{Cu}$$

La prova a vuoto completa deve essere condotta fino ad una tensione superiore del 10-20% del valore nominale. Occorre quindi una sorgente di alimentazione di potenza adatta, in grado di permettere la variazione della tensione impressa. Per avere un quadro più completo di dati, la prova a vuoto viene effettuata, ad esempio, alimentando il motore partendo con una tensione di 360 V e aumentando di volta in volta di 10 V, fino ad arrivare a una tensione massima di 440V.

Le perdite nel ferro e le perdite nel rame di statore rappresentano un apporto indesiderato ai fini dell'indagine della prova per cui vanno calcolate e detratte con la relazione:

$$P_{Cu} = \sqrt{3} * R_m * I^2$$

Tolta tale perdita dalla potenza assorbita, si ottiene un valore comprensivo delle perdite nel ferro e meccaniche:

$$P - P_{Cu} = P_m + P_f$$

Le grandezze calcolate permettono di tracciare delle caratteristiche a vuoto del motore, tutte in funzione della tensione che agisce da parametro indipendente.

- Prova a Carico

La prova a carico è la seconda prova che andiamo a effettuare. Si articola in due fasi successive:

a. Fase di variazione della tensione

Durante la prima fase il motore viene avviato ad una tensione che è pari al 90% della sua tensione nominale, andando a registrare il primo dato mantenendo la potenza erogata pari a quella nominale. La potenza erogata viene mantenuta costante agendo sul numero di giri. Continuando poi a mantenere la potenza erogata costante, viene aumentata la tensione di alimentazione, arrivando fino ad un valore massimo del 110% della tensione nominale. Molto importante per capire se il motore mantiene un rendimento accettabile anche sotto condizioni di alimentazione leggermente diverse rispetto a quelle nominali.

b. Fase di carico e quarti di coppia

La seconda fase è successiva alla prima e in questo caso non viene variata la tensione di alimentazione ma la potenza erogata. Per questa parte delle prova viene calcolata precedentemente la coppia nominale del nostro motore tramite la seguente semplice formula:

$$C_n = \frac{P_n}{w} = \frac{P_n}{n} * \frac{60}{2\pi}$$

dove  $w$  è la velocità angolare dell'albero in [rad/s] o alternativamente possiamo utilizzare i giri del motore  $n$ , che vanno inseriti in giri per minuto [rpm, giri/min]. La potenza nominale  $P_n$  deve essere inserita in Watt [W].

Calcolata la coppia nominale, questa viene divisa per quattro e si inizia la prova regolando il numero di giri in modo che il motore eroghi una potenza pari ad 1/4 di  $C_n$ . Viene poi abbassato il numero di giri fino ad ottenere un valore di potenza pari a 2/4 di  $C_n$  e così via fino ad osservare il comportamento del motore con una coppia erogata pari a 6/4 della coppia nominale. Il numero di giri andrà ad abbassarsi gradualmente, partendo da un valore prossimo alla velocità di sincronismo. È una prova molto importante per capire il funzionamento del motore in condizioni diverse da quelle nominali, in questo caso andando a vedere come variano rendimento (quindi di conseguenza potenza assorbita e potenza resa), corrente assorbita e fattore di potenza.



- Prova di Riscaldamento

La prova di riscaldamento viene eseguita alimentando il motore con una tensione nominale e regolando il numero di giri in modo da erogare una potenza pari a quella nominale. La prova di riscaldamento è strettamente legata al tipo di servizio per cui il motore è progettato. Per i motori in servizio S3 75%, ad esempio, verrà fatta una prova in cui il motore verrà lasciato acceso per almeno 45 minuti, andando poi a monitorare come variano i parametri in seguito al riscaldamento degli avvolgimenti e di tutto il motore in generale. Per un motore in servizio S1, che implica un servizio continuativo, la prova risulta conclusa quando viene raggiunto l'equilibrio termico, ossia quando viene raggiunto un certo valore di temperatura che non andrà più ad aumentare anche a seguito di svariate ore di utilizzo. Si osserva quindi come varia il rendimento, il fattore di potenza, la corrente assorbita, il numero di giri e, soprattutto, le temperature all'avvolgimento e alla carcassa, che devono rimanere entro i limiti definiti dalla classe di isolamento del nostro motore.



Figura 18: Prova di Riscaldamento Win500032

I parametri che si possono osservare mentre il motore è sottoposto alla prova di riscaldamento sono i seguenti:

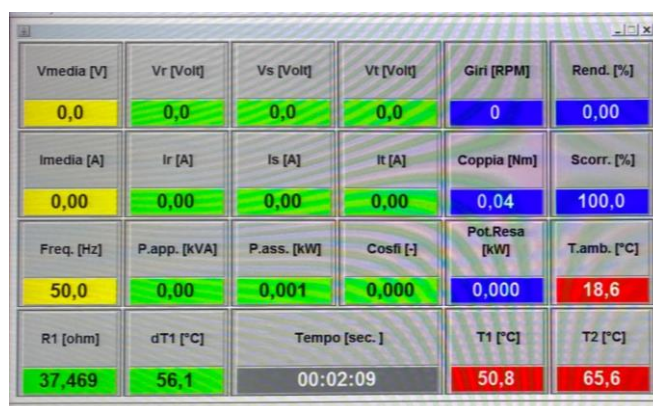


Figura 19: Dati Visualizzabili Prova di Riscaldamento

- Prova a Rotore Bloccato

Nella prova a rotore bloccato si alimenta il motore a tensione ridotta in modo da far circolare una corrente pari a quella nominale  $I_n$ . Il rotore viene bloccato meccanicamente e lo scorrimento è ovviamente pari a 1. Questa condizione è pari a quella di avviamento, dove il motore viene avviato partendo con il rotore fermo.

Nella prova a rotore bloccato, essendo bassa la tensione applicata si possono trascurare le perdite nel ferro e le perdite addizionali. In corto circuito non vi sono perdite meccaniche (il rotore è bloccato) ed essendo bassa la tensione di alimentazione si trascurano le perdite nel ferro della macchina. Si possono determinare, dalla lettura del voltmetro, la tensione di alimentazione  $V_1$  e dalla lettura dei wattmetri, la perdita per effetto Joule, il fattore di potenza e quindi si possono calcolare i parametri equivalenti interni riportati allo statore ( $R_r, X_r, Z_r$ ). Viene utilizzata una tensione di alimentazione più bassa (intorno al 30% del valore di targa) poiché la corrente assorbita allo spunto, a scorrimento unitario, può essere compresa fra 5÷7 volte la corrente nominale e la condizione di rotore bloccato danneggerebbe il motore durante le fasi di misura alla piena tensione.

L'analogia con l'avviamento è di importanza rilevante, in quanto tramite questo tipo di prova è possibile rilevare anche valori come la corrente di spunto, la coppia di spunto e i loro rapporti con le correnti nominali. Coppie di spunto troppo esigue sono negative in quanto un motore con un valore di  $C_{sp}/C_n$  troppo basso tendono ad avere problemi all'avviamento.

- Prova di Coppia Massima

La prova di coppia massima, come dice il nome, è volta a capire la coppia massima trasmissibile dal nostro motore e il numero di giri a cui questa coppia viene trasmessa, oltre al fattore di potenza, alla potenza e alla corrente assorbite. Andando a determinare questi due parametri è ovviamente definita anche la potenza massima, tramite questa semplice relazione già utilizzata nei paragrafi precedenti:

$$P_{max} = C_{max} * w = C_{max} * \frac{n}{60} * 2\pi$$

Viene effettuata andando ad avviare il motore in primis alla velocità di sincronismo, per poi andare a diminuire il numero di giri fino a zero andando ad aumentare progressivamente la coppia del motore che funge da freno posto all'interno del banco prova. Il motore posto all'interno del banco è un motore sincrono collegato a inverter e viene comandato direttamente dal programma usato per le prove Win500032. La coppia resistente massima dipende dal banco utilizzato e può arrivare ad un massimo di 500 Nm.

Tra i risultati più importanti ottenuti da questa prova abbiamo la potenza emessa, la coppia massima, la corrente assorbita, lo slittamento e il numero di giri.

## Alta Efficienza

La normativa CE 640 /2009, più nota come Direttiva Ecodesign o anche ErP (Energy related Products), che istituisce la nomenclatura dei motori elettrici IE3 è stata introdotta con l'obiettivo di diminuire le emissioni di CO<sub>2</sub> e i consumi di energia elettrica industriale su scala europea. Essa definisce un percorso, fatto di fasi progressive, per orientare e accompagnare i diversi costruttori verso una "progettazione ecocompatibile" di ogni dispositivo assorbe energia elettrica. Il consumo dei motori elettrici, infatti, corrisponde approssimativamente al 75% del consumo totale di energia. L'immediata sostituzione dei motori utilizzati in passato con i motori di nuova generazione potrebbe farci risparmiare idealmente circa 130 miliardi di kWh all'anno.

Questo rappresenta emissioni di CO<sub>2</sub> dell'ordine di circa 578 milioni di tonnellate nel 2020. L'aumento dei motori ad alta efficienza secondo il regolamento farà evitare 40 milioni di tonnellate di CO<sub>2</sub> ogni anno e si riusciranno a risparmiare circa 20 miliardi di euro di bollette in Europa.

La direttiva si appoggia alla Norma Internazionale IEC 60034-30, che definisce 4 classi di rendimento (IE) sulla base dell'efficienza nel trasformare l'energia elettrica in meccanica:

1. IE1 = efficienza standard;
2. IE2 = efficienza elevata;
3. IE3 = efficienza premium;
4. IE4 = efficienza super-premium.

Il regolamento stabilisce due fasi:

A partire dal primo luglio '21, i motori devono essere conformi come minimo alla classe di efficienza energetica IE2 nella gamma tra 0,12 e 0,75 kW. Sarà obbligatoria la classe IE3 per potenze maggiori di 0,75 kW. Dal primo luglio '23 i motori monofase e i motori a sicurezza aumentata dovranno essere conformi come minimo alla classe di efficienza energetica IE2 con potenze maggiori di 0,12 kW.

La IEC 60034-30-1 è uno standard internazionale per i motori ad alta efficienza energetica che sarà trasferito passo dopo passo alle normative nazionali in tutto il mondo. I motori elettrici rappresentano circa 1470 TWh della domanda totale di energia dell'UE nel 2020.

Caratteristiche motori interessati dalla norma:

- Tensione nominale fino a 1.000 V
- Potenze da 0,12 kW a 1000 kW
- Numero di poli 2, 4, 6 o 8 (50, 60 e 50/60 Hz)
- Funzionamento continuo (S1, S3  $\geq$  80%, e S6  $\geq$  80%)

Nei motori asincroni l'efficienza viene ottenuta principalmente andando ad utilizzare materiali più attivi. Con ogni aumento di efficienza solitamente la lunghezza del pacco statore/rotore va ad aumentare. Per evitare di andare a creare dei salti nelle dimensioni del motore si può agire in diversi modi per ottimizzare i motori asincroni: si può aumentare il riempimento delle scanalature per mezzo di avvolgimenti adattati, l'uso di lamiera per statore e rotore di qualità superiore e, se necessario, il rame come materiale del rotore. Il diagramma mostra le curve di efficienza in funzione della potenza dei motori da IE2 a IE4 nell'ambito del regolamento (UE) 2019/1781.

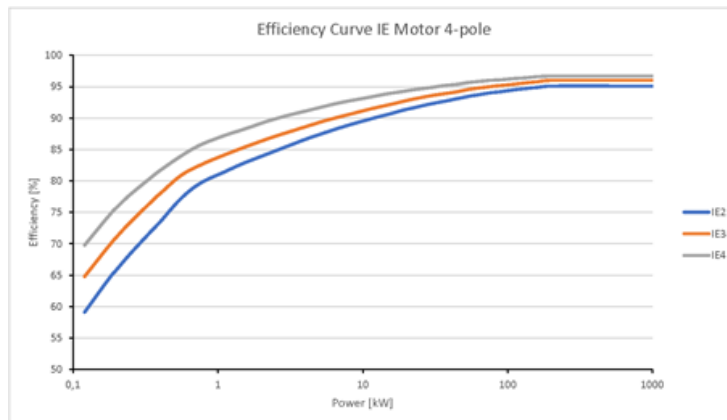


Figura 20: Curva Rendimento Motori Alta Efficienza

Eccezioni ai requisiti di classificazione IEC 60034-30-1:

- Tipo di servizio S2, S3<80 %, da S4 a S10
- Motori controllati da inverter non possono essere collegati direttamente all'alimentazione di rete.
- Motori che non possono essere misurati in maniera indipendente, ad esempio motori di pompe a rotore bagnato.

In particolare, devono avere una classe di rendimento minima IE3 (o IE2 se azionati da inverter) i motori:

- asincroni monofase e trifase a 50 Hz e 60Hz con una sola velocità e rotore a gabbia
- con tensione nominale compresa fra 50V e 1000 V;
- con potenza nominale compresa tra 0,12 kW e 375 kW;
- a 2, 4, 6 e 8 poli;
- per servizio continuo.

I costruttori sono tenuti a una serie di adempimenti per poter commercializzare i propri motori; nel dettaglio devono indicare:

- anno di fabbricazione
- efficienza nominale al 100% del carico e della tensione nominali
- livello di efficienza IE
- marcatura CE
- dichiarazione di conformità ai sensi della Direttiva ErP 2009/125/CE

Almeno i primi 3 tra questi dati devono essere riportati:

- nella targhetta
- nella scheda tecnica o nel manuale di istruzioni del motore
- sul sito web

È inoltre necessario che siano inseriti nella scheda tecnica fornita con i prodotti in cui il motore è incorporato.

Il passaggio successivo si avrà nel 2023 con l'obbligo della classe di efficienza internazionale IE2 anche per i motori monofase con potenze pari o superiori a 0,12 kW.

Esempio di scheda tecnica per motori IE3 da M80 a M160 - 2 poli:

MOTORI ASINCRONI TRIFASE IE3 Serie MHE3 - 2 Poli					VALTARO MOTORI				
Serie M 400 (V) 50 (Hz) 2 POLI - Series M 400 (V) 50 (Hz) 2 POLES					IEC 60034-30; 2008				
TIPO Type	Potenza Pn (kW) Rated Output (kW)	Velocità min Speed min	Corr. Nom Rated current	Rendimento IE3 (%) IE3 efficiency (%)	Fattore di potenza Output factor	C. nom. Rated current	C. avv./C.nom. Start.curr./Rated curr.	C.max./C.nom. Max c./Rated c.	Corr.avv./Corr.nom Start c./Rated c.
	Pn (kW)	n (1/min)	In (A)	100%	Cosφ	Mn (Nm)	Ma/Mn	Mm/Mn	Ia/In
80 A2	0,75	2940	2,1	81,6	0,62	2,5	3,6	6,2	6,1
80 B2	1,1	2920	2,8	82,7	0,73	3,7	6,5	5,3	8,7
90S A2	1,5	2860	3,6	84,8	0,74	5,1	4,9	4	5,9
90L B2	2,2	2900	5,6	86,1	0,68	7,4	5,8	5	6,9
100 A2	3	2910	6,1	87,1	0,82	9,7	4,7	3,9	9,6
112 A2	4	2890	7,3	88,1	0,89	13,5	4,1	3,7	8,4
132S A2	5,5	2920	10,3	89,2	0,86	17,8	6,7	3,3	11,5
132L A2	7,5	2930	14,4	90,1	0,83	24,3	5,3	3,8	11,6
160L A2	15	2940	26,8	91,9	0,88	48,5	4,4	3,9	7,1
160L B2	18,5	2950	31,9	92,7	0,91	60,9	4	2,9	8,5

Figura 21: Scheda Tecnica Tipica Motori IE



## Esempio di prova a banco

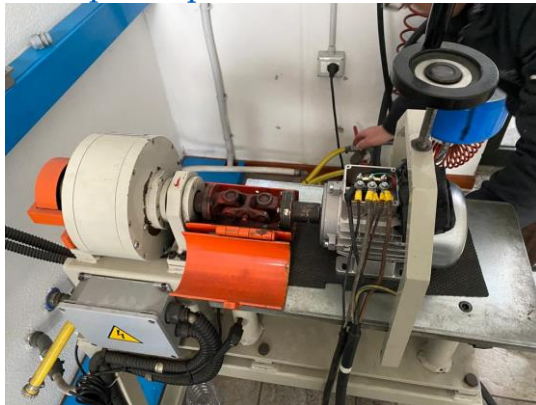


Figura 23: M63C2 durante prova a banco

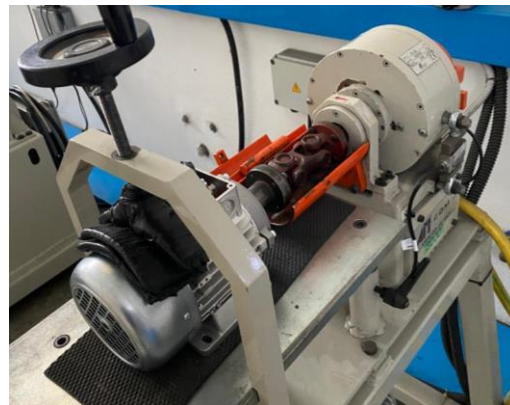


Figura 22: M63C2 durante prova a banco

Il motore in questione è un M63, caratterizzato da una potenza nominale maggiorata di 0,55 kW. È il motore che è stato scelto come caso di studio. Di seguito troviamo tutte le prove relative a questo motore, i cui dati verranno utilizzati per andare a sviluppare il suo modello energetico. All'interno della seguente tabella troviamo le caratteristiche meccaniche ed elettriche del nostro motore. Verrà in seguito collegato a stella e provato per verificare che i requisiti siano soddisfatti.

### VALTARO MOTORI S.r.l.

#### THREE-PHASE ASYNCHRONOUS MOTOR TEST

FILE:	00000000.PRO	Directory	PROVE TRI	DATE:	14/02/2022
MOTOR TYPE:	M63C2	SUPPLY:	THREE-PHASE	RATED VOLT. Y [V]:	400
RATED VOLT. D [V]:	230	RATED CURR. Y [A]:		RATED CURR. D [A]:	
INPUT POWER [kW]:		OUTPUT POWER [kW]:	0,55	OUTPUT POWER [HP]:	0,75
INSULATION CLASS:	F	PROTECTION [IP]:	44	COSFI	
EFFICIENCY [%]:		FREQUENCY [Hz]:	50	RATED SPEED [r/min]:	
POLES:	2	DUTY TYPE:	S2	CONNECTION TYPE:	

Figura 24: Raccolta Dati M63C2

Essendo un tipo di servizio S2 non rientra nei motori che devono seguire le norme di alta efficienza; pertanto, segue un iter di prova classico costituito dalla misurazione della resistenza di statore a freddo, da una prova a vuoto, una a carico, una prova di riscaldamento, una prova a rotore bloccato e una prova di coppia massima.

Dopo aver effettuato le prove, i risultati fondamentali vengono condensati in una tabella che comprende ogni informazione importante per conoscere le caratteristiche del motore. Da questa tabella verranno ricavati i cosiddetti "valori di targa" del motore, evidenziati in giallo:

		<b>DATI DI TARGA TRIFASE</b>	
MOD DTT		Data:	Pag. : 1/1
CODICE MOTORE:		CLIENTE:	
TIPO: <b>M63C2</b>	POTENZA (kW): <b>0,55</b>	VOLT (V): <b>230/400</b>	HERTZ (Hz): <b>50</b>
ASSORBIMENTO in Ampere (A): <b>1,4 / 1,4</b>	N°GIRI (Rpm): <b>2800</b>	SERVIZIO: <b>S2 18MIN</b>	COSφ: <b>0,81</b>
ASSORBIMENTO in Ampere (A):	N°GIRI (Rpm):	SERVIZIO:	COSφ:
CLASSE DI ISOLAMENTO: <b>F</b>	N°FASI: <b>3</b>	TIPO DI COLLEGAMENTO: <b>Δ / A</b>	
COPPIA NOMINALE (Cn) in Nm: 1,91		COPPIA MASSIMA (Ca) in Nm: 5,01	
COPPIA DI SPUNTO (Ca/Cn): 2,61			
RENDIMENTO (%): 71,1			
TEMPO DI RISCALDAMENTO (min): 18	dt1: 82,5	dt2:	
TEMPERATURA CARCASSA (C°): 67,2		TEMPERATURA VANO MORSETTIERA (C°): 72,6	
AMPERE A VUOTO (A): <b>Volt 400 Ampere 0,95</b>		RESISTENZA OHMICA (Q): <b>31</b>	
NOTE: MOTORE SENZA VENTILAZIONE - PROVA V. 400-50HZ			

Figura 25: Dati di Targa M63C2

Di seguito la prova del motore M63 preso come caso di studio:

### NO LOAD TEST

Freq.	Vr	Vs	Vt	V.med.	Ir	Is	It	I.med.	Unbal.	In Power	App. P.	Cosfi	R1
Hz	V	V	V	V	A	A	A	A	%	kW	kW	-	Ohm
50,2	361,9	359,5	361,7	361,0	0,737	0,723	0,717	0,726	2,667	0,086	0,454	0,190	36,047
50,0	369,6	367,1	369,3	368,7	0,766	0,753	0,747	0,756	2,564	0,091	0,483	0,189	36,806
50,2	383,9	381,4	383,8	383,0	0,838	0,824	0,814	0,826	2,924	0,101	0,548	0,185	38,293
50,0	391,1	388,8	391,1	390,3	0,875	0,867	0,852	0,865	2,260	0,107	0,586	0,182	38,994
50,2	401,7	399,6	401,8	401,0	0,934	0,928	0,914	0,924	2,072	0,117	0,642	0,182	40,046
50,0	412,0	409,8	412,2	411,3	1,008	1,003	0,985	0,998	2,404	0,127	0,711	0,179	41,150
50,0	430,7	428,6	430,9	430,0	1,166	1,161	1,142	1,156	2,083	0,152	0,860	0,177	42,948
50,2	441,4	439,5	441,8	440,9	1,287	1,289	1,263	1,280	1,901	0,178	0,978	0,182	44,007

### LOAD TEST

Torque	Out Power	Eff.	Slip	Unbal.	Freq.	Vr	Vs	Vt	V.med.	Ir	Is	It	I.med.	In Power	Cosfi	Speed
Nm	kW	%	%	%	Hz	V	V	V	V	A	A	A	A	kW	-	r/min
1,961	0,557	70,5	9,547	1,792	50,0	361,0	358,0	360,3	359,7	1,47	1,45	1,47	1,46	0,791	0,87	2713
1,936	0,555	71,9	8,767	1,583	50,0	370,9	368,2	370,3	369,8	1,42	1,40	1,42	1,41	0,772	0,85	2737
1,911	0,552	72,5	8,040	1,757	50,0	382,5	379,5	381,9	381,3	1,39	1,36	1,38	1,38	0,762	0,84	2759
1,902	0,553	73,1	7,635	1,845	50,1	393,7	390,9	393,3	392,6	1,37	1,35	1,37	1,36	0,757	0,82	2775
1,905	0,556	73,2	7,184	2,125	50,0	400,5	397,5	399,9	399,4	1,38	1,35	1,37	1,36	0,759	0,80	2784
1,885	0,552	73,0	6,762	1,847	50,0	413,3	410,6	413,2	412,3	1,38	1,35	1,36	1,36	0,756	0,78	2797
1,886	0,554	72,7	6,487	2,027	50,0	422,3	419,3	422,1	421,2	1,40	1,37	1,38	1,38	0,762	0,76	2805
1,878	0,554	72,4	6,116	1,717	50,0	432,4	429,7	432,1	431,4	1,42	1,39	1,40	1,41	0,766	0,73	2817
1,882	0,557	72,0	5,860	1,816	50,0	440,4	437,6	440,1	439,4	1,45	1,43	1,43	1,44	0,774	0,71	2824
0,438	0,136	55,7	1,469	2,333	50,0	402,4	399,8	402,0	401,4	0,95	0,94	0,93	0,94	0,244	0,37	2956
0,914	0,278	69,1	3,167	2,836	50,0	403,1	400,6	403,1	402,2	1,03	1,01	1,01	1,02	0,403	0,57	2905
1,385	0,413	72,6	5,445	2,178	50,2	401,9	399,4	401,8	401,1	1,16	1,14	1,15	1,15	0,569	0,71	2848
1,902	0,553	72,0	7,845	1,346	50,2	402,4	399,9	402,4	401,6	1,38	1,36	1,37	1,37	0,767	0,81	2775
2,437	0,685	69,0	10,533	1,116	50,0	402,3	399,7	402,3	401,4	1,66	1,64	1,66	1,66	0,993	0,86	2684
3,105	0,820	62,0	15,944	1,038	50,0	400,4	397,8	400,4	399,5	2,12	2,10	2,12	2,11	1,321	0,90	2521

### TEMPERATURE RISE TEST

Time	Speed	Torque	Out Power	Eff.	T1	T2	Amb. T.	R1	dT1	Freq.	V.med.	I.med.	In Power	Cosfi
hh:mm:ss	r/min	Nm	kW	%	°C	°C	°C	Ohm	°C	Hz	V	A	kW	-
00:01:00	2816	1,881	0,555	71,2	20,5	20,0	18,6	31,378	5,5	50,0	399,3	1,407	0,779	0,800
00:02:00	2812	1,876	0,553	71,0	22,3	22,4	18,5	32,787	17,4	50,0	400,5	1,403	0,779	0,800
00:03:00	2808	1,885	0,554	70,9	24,8	25,4	18,4	33,469	23,3	50,0	401,1	1,403	0,782	0,802
00:04:00	2804	1,888	0,554	71,1	27,7	28,8	18,6	34,066	27,9	50,0	401,0	1,398	0,779	0,803
00:05:00	2804	1,882	0,553	71,8	30,9	32,4	18,7	34,625	32,3	50,0	402,0	1,383	0,769	0,799
00:06:00	2802	1,879	0,551	71,8	34,0	35,8	18,6	35,196	37,1	50,0	402,2	1,381	0,768	0,798
00:07:00	2797	1,876	0,550	71,7	37,0	39,3	18,6	35,670	41,2	50,0	402,6	1,377	0,766	0,798
00:08:00	2792	1,885	0,551	71,3	40,0	42,6	18,7	36,196	45,4	50,0	401,6	1,382	0,772	0,804
00:09:00	2791	1,893	0,553	72,3	43,0	45,9	18,7	36,651	49,2	50,2	400,9	1,371	0,765	0,804
00:10:00	2788	1,893	0,553	72,3	45,7	49,2	18,8	37,047	52,4	50,1	400,9	1,369	0,764	0,804
00:11:00	2786	1,885	0,550	71,9	48,5	52,5	18,7	37,514	56,3	50,0	401,4	1,367	0,764	0,804
00:12:00	2777	1,902	0,553	71,3	51,3	55,4	18,7	38,150	61,6	50,0	400,9	1,380	0,776	0,810
00:13:00	2773	1,911	0,555	71,6	53,8	58,6	18,7	38,514	64,5	50,0	400,1	1,377	0,775	0,812
00:14:00	2767	1,911	0,554	71,4	56,9	61,4	18,6	38,780	66,8	50,1	399,7	1,376	0,775	0,814
00:15:00	2764	1,917	0,555	71,6	58,6	64,2	18,6	39,390	71,7	50,0	399,6	1,375	0,775	0,814
00:16:00	2763	1,911	0,553	71,3	62,1	67,0	18,5	40,033	77,4	50,0	399,8	1,373	0,775	0,815

### LOCKED-ROTOR TEST

Freq.	V.med.	I.med.	Unbal.	In Power	Cosfi	Torque	Vnom	Inom.	Tnom.	Ist.	tst.	Ist./Inom.	Tst./Tnom.
Hz	V	A	%	kW	-	Nm	V	A	Nm	A	Nm	-	-
50,2	356,9	5,068	0,678	2,801	0,893	3,892	402,3	1,370	1,910	5,718	4,990	4,178	2,616

### MAXIMUM TORQUE TEST

Speed	Torque	Out Power	Eff.	Slip	Unbal.	Freq.	V.med.	I.med.	In Power	Cosfi
r/min	Nm	kW	%	%	%	Hz	V	A	kW	-
1534	5,014	0,884	31,9	43,85	0,737	50,2	401,8	4,449	2,810	0,911

Figura 26: Prova a Banco Completa M63C2



Per quanto riguarda le prove su motori ad alta efficienza, seguono un iter leggermente diverso, poiché le prove devono essere effettuate secondo un preciso schema fornito dalla Norma Internazionale CEI EN 60034-2-1.

Possiamo di seguito vedere una prova di carico effettuata su un M100A4 kW 2,2 IE2 in servizio S1:

PROVA A CARICO																
Coppia Nm	Pot.Resa kW	Rend. %	Scorr. %	Squill. %	Freq. Hz	Vr Volt	Vs Volt	Vt Volt	Vmedia V	Ir A	Is A	It A	Imedia A	P.ass. kW	Cosfi -	Giri RPM
23.145	3.316	78.5	8.750	2.877	50.0	401.7	402.5	400.2	401.4	7.21	7.16	7.00	7.12	4.222	0.85	1368
23.013	3.299	78.6	8.726	3.003	50.0	401.1	402.1	400.0	401.2	7.18	7.10	6.96	7.08	4.196	0.85	1369
23.084	3.284	78.3	8.780	2.274	49.9	401.0	401.8	400.0	400.9	7.22	7.07	7.06	7.12	4.227	0.85	1367
18.997	2.781	81.9	6.739	3.058	49.9	400.9	401.7	400.2	401.0	5.98	5.88	5.80	5.89	3.386	0.83	1397
18.687	2.741	81.7	6.664	4.350	50.0	401.0	401.6	399.8	400.8	5.91	5.82	5.65	5.79	3.329	0.83	1399
18.585	2.724	82.4	6.655	3.282	50.0	400.8	401.1	399.8	400.6	5.84	5.79	5.65	5.76	3.309	0.83	1400
15.010	2.235	84.7	5.088	3.483	50.0	400.7	401.7	400.1	400.8	4.90	4.87	4.73	4.83	2.635	0.79	1423
14.772	2.207	84.8	4.919	3.041	50.0	400.7	401.9	400.2	400.9	4.82	4.80	4.68	4.77	2.606	0.79	1425
14.939	2.231	84.3	5.002	4.786	50.0	400.8	401.7	400.6	401.0	4.91	4.86	4.68	4.82	2.629	0.79	1424
11.044	1.672	85.1	3.563	4.848	50.0	401.5	402.9	400.6	401.6	4.02	4.02	3.83	3.96	1.962	0.71	1447
11.059	1.676	85.1	3.476	4.064	50.0	401.5	402.8	400.6	401.6	4.02	4.04	3.87	3.97	1.970	0.71	1447
10.826	1.645	85.8	3.371	4.562	50.0	401.9	402.7	400.7	401.8	3.95	4.02	3.83	3.93	1.920	0.70	1448
7.586	1.164	84.3	2.301	5.539	50.0	400.2	400.7	399.7	400.2	3.40	3.38	3.21	3.33	1.380	0.60	1465
7.220	1.108	83.7	2.172	5.680	50.0	400.1	400.6	399.3	400.0	3.36	3.33	3.17	3.29	1.323	0.58	1466
7.251	1.112	83.6	2.129	5.659	49.9	399.9	400.6	399.3	399.9	3.36	3.33	3.17	3.26	1.328	0.58	1466
3.589	0.553	75.2	1.009	6.333	50.0	402.1	403.0	401.6	402.3	2.94	2.97	2.78	2.90	0.737	0.36	1484
3.534	0.551	75.7	1.157	7.017	50.0	402.1	403.0	401.6	402.3	2.94	2.98	2.77	2.90	0.730	0.36	1483
3.691	0.568	76.0	1.146	6.023	50.0	401.5	402.3	401.1	401.6	2.99	2.95	2.81	2.91	0.742	0.37	1483
1.350	0.210	50.7	0.389	7.290	49.9	402.0	402.8	401.1	402.0	2.82	2.88	2.67	2.79	0.406	0.21	1492
1.375	0.217	53.0	0.494	7.329	50.0	401.6	402.5	401.0	401.7	2.82	2.89	2.67	2.79	0.411	0.21	1493
1.370	0.216	51.8	0.449	6.852	50.0	401.3	402.1	400.7	401.4	2.81	2.88	2.68	2.76	0.413	0.21	1493
14.998	2.230	84.6	5.898	1.696	50.3	359.7	359.0	362.4	360.4	5.15	5.11	5.05	5.10	2.636	0.83	1420
15.220	2.270	85.1	5.000	2.397	50.0	371.1	370.5	374.0	371.9	5.13	5.08	5.01	5.07	2.670	0.82	1425
14.804	2.216	84.9	4.690	2.564	50.0	379.4	378.9	382.6	380.3	4.98	4.95	4.86	4.93	2.611	0.80	1430
14.864	2.230	84.8	4.467	2.559	50.0	390.0	389.6	393.0	390.9	4.97	4.94	4.84	4.92	2.630	0.79	1433
14.924	2.246	85.5	4.267	2.868	50.0	399.9	399.9	403.5	401.1	4.93	4.93	4.79	4.89	2.625	0.77	1438
14.791	2.231	84.8	4.003	2.852	50.0	409.8	409.9	413.4	411.0	4.95	4.95	4.81	4.91	2.634	0.75	1440
14.484	2.190	84.8	4.331	3.568	50.4	419.7	420.2	423.7	421.2	4.91	4.94	4.78	4.87	2.584	0.73	1444
14.439	2.188	84.6	3.587	3.880	50.0	428.9	429.4	432.8	430.4	4.97	5.01	4.82	4.93	2.587	0.70	1446
14.583	2.211	84.3	3.467	4.269	50.0	438.7	439.5	442.7	440.3	5.10	5.16	4.94	5.07	2.619	0.68	1448

Figura 27: Prova a Carico M100A4 IE2

Dopodiché viene provato il motore alla sua potenza nominale andando a variare la tensione, che parte dal 90% per arrivare fino al 110% di quella nominale.

Per quanto riguarda i motori ad alta efficienza, poi, i dati devono essere catalogati all'interno di una tabella che contiene ogni tipo di informazione relativa alle prove effettuate in precedenza e, in più, contiene il calcolo della potenza persa attraverso il ferro, attraverso l'avvolgimento e per attrito, fino ad arrivare al fattore di potenza e al calcolo dell'efficienza per ogni tipo di percentuale di carico. Il calcolo delle perdite viene effettuato in automatico dal programma usato per le prove Win500032 quando il motore viene provato alle diverse percentuali di carico.

Date of test:		05/11/2021		Report number		1		Date of issue:		05/11/2021	
Motor description											
Rated output power	kW		0.18		Manufacturer		VALTARO				
Rated voltage	V		230/400		Model Nr.		M63B4				
Rated current	A		0.95/0.55		Serial Nr.		90				
Rated speed	min-1		1330		Duty type of IEC 60031-1						
Cos fi			0.74		Design						
Supply frequency	Hz		50		Insulation class IEC 60085		F				
Number of Phases	-		3		Max. ambient temperature		°C		40		
IEC 60034-30-1 (rated)		IE-Code		#RIFI							
Initial motor conditions											
Test resistance	R <sub>i</sub>		Ω		99.9						
Winding temperature	θ <sub>w</sub>		°C		22.4						
Ambient temperature	θ <sub>a</sub>		°C		22.4						
6.1.3.2.1 Rated load test											
Test resistance	R <sub>i</sub>		Ω		113.217						
Winding temperature	θ <sub>w</sub>		°C		56.8						
Ambient temperature	θ <sub>a</sub>		°C		23.1038						
6.1.3.2.3 Load curve test											
Rated output power	%		125%		115%		100%		75%		50%
Torque	T		Nm		1.74		1.55		1.30		0.93
Input power	P <sub>1</sub>		W		369.6		324.2		268.7		195.9
Operating speed	n		min-1		1233		1275		1325		1386
Terminal voltage	U <sub>1</sub>		V		399.6		399.6		400.1		399.9
Frequency	f		Hz		50.0		50.0		50.0		50.0
Winding temperature	θ <sub>w</sub>		°C		57.8		58.9		58.7		55.1
Test resistance before load test		R		Ω		113.678					
6.1.3.2.4 No-Load test											
Rated voltage	%		110%		100%		95%		60%		50%
Input power	P <sub>1</sub>		W		45.6		37.8		34.0		30.2
Line current	I <sub>Δ</sub>		A		0.43		0.38		0.35		0.33
Terminal voltage	U <sub>Δ</sub>		V		440.2		400.2		380.7		360.2
Frequency	f <sub>Δ</sub>		Hz		50.0		50.0		50.0		50.0
W. temper	θ <sub>w</sub>		°C		43.9		48.0		48.7		47.5
Test resistance before no-load test		R		Ω		108.224					
6.1.3.2.3 Load curve test											
Rated output power corr.	P <sub>2,q</sub>		%		125%		115%		100%		75%
Output power corrected	P <sub>2,q</sub>		W		224.9		206.8		179.7		134.9
Slip corrected	s <sub>q</sub>		W		0.179		0.151		0.117		0.077
Input power corrected	P <sub>1,q</sub>		W		370.1		324.4		268.8		196.2
Iron losses	P <sub>fe</sub>		W		7.3		7.6		7.9		8.4
Frict. and wind. losses corr.	P <sub>fw,q</sub>		W		2.8		3.1		3.4		3.8
Additional load losses	P <sub>LL</sub>		W		8.2		6.5		4.5		2.9
Stator losses corrected	P <sub>s,q</sub>		W		75.8		62.1		48.4		35.1
Rotor losses corrected	P <sub>r,q</sub>		W		51.3		38.4		24.9		11.7
Power factor	cos φ		-		0.803		0.777		0.729		0.624
Efficiency	η		%		60.8		63.7		66.8		68.8



### 3. CAPITOLO

## SIMULAZIONE

### Utilizzi della simulazione

Come detto in precedenza, l'obiettivo fondamentale di questa tesi è quello di utilizzare tutti i dati raccolti per creare un modello di motore a induzione che rispecchi le sue prestazioni durante le prove a banco, con un grado di errore accettabile.

Questo modello, quindi, verrà utilizzato per stimare l'efficienza di tale motore se sottoposto a cicli di carico reali, corrispondenti ad applicazioni comuni e non, di motori elettrici nel campo dell'industria.

Possiamo capire da ciò l'importanza dei programmi di simulazione come Matlab & Simulink, che ci permettono di creare modelli che possono aiutarci, nel nostro caso, nella stima di vari parametri, per prevedere l'idoneità di un certo tipo di motore ad un certo tipo di applicazione.

Tramite un modello simile a quello reale, quindi, i programmi di simulazione ci permettono di ottenere risultati verosimili ed efficaci, con un notevole risparmio di tempo e risorse.

### Calcolo dei Parametri

Il primo passo che è stato compiuto, dunque, è stato quello di ricavare i parametri fondamentali di un motore a induzione:

- |                                 |                    |
|---------------------------------|--------------------|
| - Resistenza di Statore         | $R_s$ [ $\Omega$ ] |
| - Resistenza di Rotore          | $R_r$ [ $\Omega$ ] |
| - Resistenza di Magnetizzazione | $R_m$ [ $\Omega$ ] |
| - Induttanza di Statore         | $L_s$ [H]          |
| - Induttanza di Rotore          | $L_r$ [H]          |
| - Induttanza di Magnetizzazione | $L_m$ [H]          |

Questi parametri possono essere ricavati dalle prove a banco, in particolare dalla prova a vuoto e da quella a rotore bloccato.

Altri importanti parametri sono:

- |   |                      |
|---|----------------------|
| - Tensione e Frequenza di alimentazione | - Power Factor       |
| - Tipo di collegamento                  | - Momento di Inerzia |

Anche questi 4 parametri vengono ricavati dalle prove a banco.

La prova a vuoto è caratterizzata dal seguente schema semplificato:

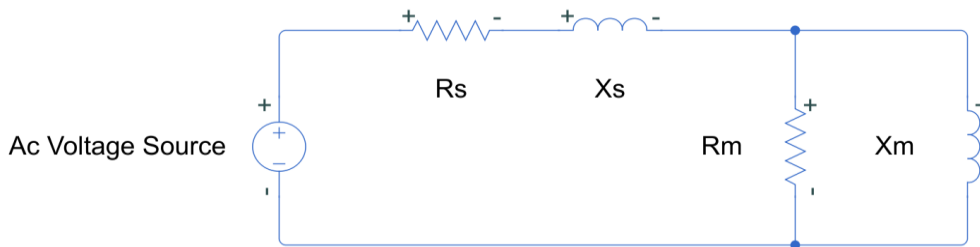


Figura 29: Schema Semplificato Prova a Vuoto

Dalla legge di Ohm, sappiamo che l'impedenza totale del circuito è pari al rapporto tra la tensione di alimentazione e la corrente che scorre nel circuito. Tradotto in formule, otteniamo:

$$Z = \frac{V}{I}$$

Il primo modello, è il modello di un motore asincrono trifase, in particolare un M63 0,55 kW 2 Poli collegato a stella, con tensione di alimentazione pari a 400 V. Le prove a banco del seguente motore (riportate nei paragrafi precedenti), ci dicono che, con una tensione di alimentazione pari a 401 V, il motore assorbe una corrente pari a 0,924 A, con un fattore di potenza PF pari a 0,182.

Come prima cosa, viene calcolato il valore della resistenza di statore a freddo  $R_s$ , tramite l'utilizzo dei seguenti dati:

```
% DATI PROVA A VUOTO
Rh = 40.046;
% ^ DATI RIFERITI PRIMO RISULTATO MEMORIZZATO PROVA DI RISCALDAMENTO
dt=5.5;
Tamb=18.6;
f=50;
w=2*pi*f;
%--> FORMULA
Rs = (Rh * (Tamb+235))/(dt+235 + Tamb);
disp(Rs);
% Rs=39.195;
```

Possiamo ora calcolare il valore di  $Z$ , tramite l'utilizzo dei seguenti dati forniti dalla prova a vuoto a tensione pari a quella nominale:

```
% DATI PROVA A VUOTO
PF=0.182;
V=401;
I=0.924;
phi=acos(PF);
%--> FORMULA
Z0=V/(I*exp(-1i*phi));
disp(Z0);
% Z0=79.123 + 427.48i
```

L'impedenza totale viene calcolata come la somma tra la serie di  $R_s$ ,  $jX_s$  e il parallelo tra  $X_m$  e  $R_m$ . Il valore dell'impedenza totale viene poi posto uguale al valore di  $Z_0$ , nel seguente modo:

```
% 79.123 + 427.48i = Rs+1i*Xs+1i*(Rm*Xm)/(Rm+1i*Xm);

% real(Z0) = Rs + (Xm^2*Rm)/(Xm^2+Rm^2);
% imag(Z0) = Xs + (Xm*Rm^2)/(Xm^2+Rm^2);
```

Dalla prova a rotore bloccato invece, tramite i seguenti dati, si possono calcolare la resistenza di rotore e l'impedenza di statore, andando a porre  $X_s + X_r = 2X$ , siccome i due valori delle impedenze non sono ricavabili singolarmente, e quindi il loro contributo viene posto al 50% del contributo totale.

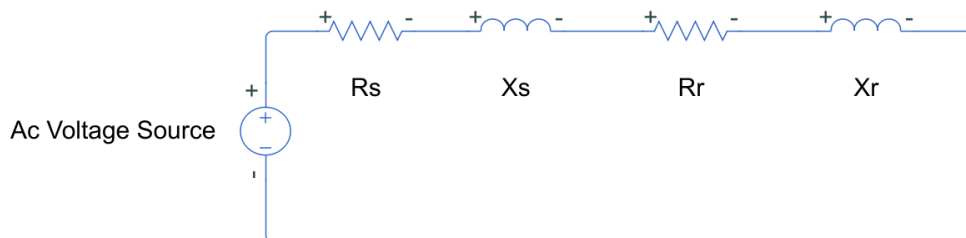


Figura 30: Schema Semplificato Prova a Rotore Bloccato

Il valore dell'impedenza  $Z_1$  è calcolato come la somma tra  $R_s$ ,  $R_r$  e le impedenze  $jX_s$  e  $jX_r$ .

```
% DATI PROVA A ROTORE BLOCCATO
V1=356.9;
I1=5.068;
PF2=0.893;
phi_2=acos(0.893);
```

Viene calcolato prima il valore di  $Z_1$ :

```
Z1=V1/(I1*exp(-1i*(phi_2)));
disp(Z1);
% Z1=62.8871 +31.6940i;
```

E dopodiché posto uguale all'impedenza totale  $Z_1$ :

```
% (Rs+Rr) + 1i*(Xs+Xr)= V1/(I1*exp(1i*phi_2));
```

Sostituendo e semplificando, otteniamo i valori di Rs, Rr, Xs, Xr:

```
% Xs=Xr=X;
% real(Z1)=Rs+Rr;
% imag(Z1)=2X;
Rr=real(Z1)-Rs;
disp(Rr);
% Rr= 23.7

X=imag(Z1)/2;
disp(X);
Ls = X/w;
disp(Ls);
% Xs=Xr=15.847 Ls=Lr=0.0504;
```

Ora si può facilmente ottenere, dividendo le equazioni della prova a vuoto l'una per l'altra, il rapporto tra l'impedenza Xm e la resistenza Rm, che risulta essere pari a:

$$\frac{Xm}{Rm} = \frac{Re[Z0] - Rs}{Im[Z0] - Xs} = 0.119$$

Questo rapporto viene sostituito all'interno di una delle due equazioni, ottenendo il valore di Xm e Lm, pari rispettivamente a:

$$Xm = (Im[Z0] - Xs) * \left(1 + \frac{Xm^2}{Rm^2}\right) = 411.633 * (1 + 0.119^2) = 417.462 \Omega$$

$$Lm = \frac{Xm}{w} = \frac{417.46}{2 * pi * f} = 1.33 H$$

Posso ora calcolare Rm, che vale:

$$Rm = \frac{Xm}{0.119} = 3508 \Omega$$

Riordinando i valori ottenuti abbiamo:

Nome	Valore	Unità di Misura
Rs	39,19	$\Omega$
Rm	3508	$\Omega$
Rr	23,7	$\Omega$
Ls	0,054	H
Lm	1,33	H
Lr	0,054	H

Tabella 1: Raccolta Parametri M63C2

## Modelli Energetici

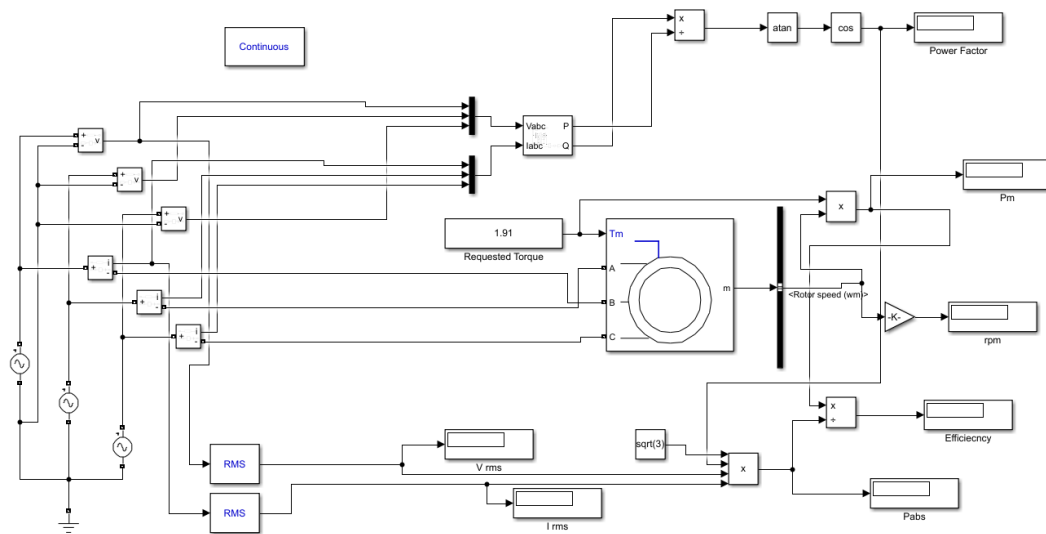


Figura 31: Primo Modello Motore a Induzione

Per verificare che i parametri calcolati fossero effettivamente corretti, si è andati ad utilizzare un modello Simulink di motore a induzione, il quale è stato collegato ad una sorgente trifase e all'interno del quale sono stati inseriti i valori calcolati in precedenza:

Block Parameters: Asynchronous Machine SI Units

Asynchronous Machine (mask) (link)

Implements a three-phase asynchronous machine (wound rotor, squirrel cage or double squirrel cage) modeled in a selectable dq reference frame (rotor, stator, or synchronous). Stator and rotor windings are connected in wye to an internal neutral point.

Configuration Parameters Load Flow

Nominal power, voltage (line-line), and frequency [ Pn(VA), Vn(Vrms), fn(Hz) ]: [ 550 400 50 ]

Stator resistance and inductance [ Rs(ohm) Lls(H) ]: [ 39.195 0.0503 ]

Rotor resistance and inductance [ Rr'(ohm) Llr'(H) ]: [ 23.7 0.0503 ]

Mutual inductance Lm (H): 1.37

Inertia, friction factor, pole pairs [ J(kg.m^2) F(N.m.s) p() ]: [ 0.0002 0.0055 1 ]

Initial conditions

[slip, th(deg), ia, ib, ic(A), pha, phb, phc(deg)]:

[ 1 0 0 0 0 0 0 ]

☐ Simulate saturation

Plot

[ i(Arms) ; v(VLL rms) ]: 1, 302.9841135, 428.7778367 ; 230, 322, 414, 460, 506, 552, 598, 644, 690

OK Cancel Help Apply

Figura 32: Parametri Richiesti da modello simulink di motore a induzione

Questi modelli ci hanno permesso di ottenere i parametri in uscita fondamentali di un motore elettrico, quali rendimento, fattore di potenza, potenza meccanica, potenza assorbita, corrente assorbita e tanti altri.

## Validazione di Modelli Energetici

Il modello è stato ritenuto valido nel momento in cui i 2 modelli creati (uno per la prova a vuoto e uno per la prova a carico) hanno restituito valori in uscita molto vicini a quelli reali, come si può vedere dalle seguenti tabelle, riferite alla prova a vuoto:

PROVA REALE A VUOTO (TENSIONE NOMINALE)				
Freq.	Vmedia	Imedia	Passorbita	PF
50	401,7	0,924	0,117	0,182
PROVA SIMULATA A VUOTO (TENSIONE NOMINALE)				
Freq.	Vmedia	Imedia	Passorbita	PF
50	400,2	0,893	0,117	0,189

Tabella 2: Confronto dati prova a vuoto M63C2

Per quanto riguarda la prova a carico invece, otteniamo i seguenti risultati:

PROVA REALE A CARICO							
Carico	Vmedia	Imedia	Passorbita	Pmecc	Giri	Rendimento	PF
25% - 0,438 Nm	401,4 V	0,94 A	0,244 kW	0,136 kW	2956	55,7%	0,37
50% - 0,914 Nm	402,2 V	1,02 A	0,403 kW	0,278 kW	2905	69,1%	0,57
75% - 1,385 Nm	401,1 V	1,15 A	0,569 kW	0,413 kW	2848	72,6%	0,71
100% - 1,902 Nm	401,6 V	1,37 A	0,767 kW	0,553 kW	2775	72%	0,81
125% - 2,437 Nm	401,4 V	1,66 A	0,993 kW	0,685 kW	2684	69%	0,86
150% - 3,105 Nm	399,5 V	2,11 A	1,321 kW	0,82 kW	2521	62%	0,9
PROVA SIMULATA A CARICO							
Carico	Vmedia	Imedia	Passorbita	Pmecc	Giri	Rendimento	PF
25% - 0,438 Nm	400,2 V	0,91 A	0,199 kW	0,135 kW	2950	56,9%	0,375
50% - 0,914 Nm	400,2 V	1,01 A	0,401 kW	0,278 kW	2901	69,1%	0,57
75% - 1,385 Nm	400,2 V	1,15 A	0,564 kW	0,413 kW	2848	73,3%	0,71
100% - 1,91 Nm	400,3 V	1,37 A	0,765 kW	0,557 kW	2782	72,7%	0,81
125% - 2,437 Nm	400,2 V	1,65 A	0,993 kW	0,689 kW	2699	69%	0,87
150% - 3,105 Nm	399,5 V	2,1 A	1,315 kW	0,834 kW	2567	63,4%	0,91

Tabella 3: Confronto Dati Prova a Carico M63C2

## Stime su cicli di lavoro reali

Le applicazioni che vedono interagire un motore elettrico con un qualsiasi utilizzatore (generalmente meccanico) sono davvero molte. Esempi tipici sono motori elettrici che azionano le ventole nei forni, che azionano nastri trasportatori o pompe centrifughe.

Ad ogni tipo di applicazione corrisponde una curva di carico differente. Alcuni tipi di carico sono caratteristici nel mondo industriale. Conoscere il profilo di carico (intervallo di velocità, coppia e potenza) è essenziale quando si seleziona un motore adatto per l'applicazione.

I tipi più comuni di carico sono:

1. A Coppia Costante
2. A Coppia Quadratica
3. A Potenza Costante
4. A Potenza/Coppia costanti
5. Con Coppia di Avviamento Elevata

### 1. Coppia costante

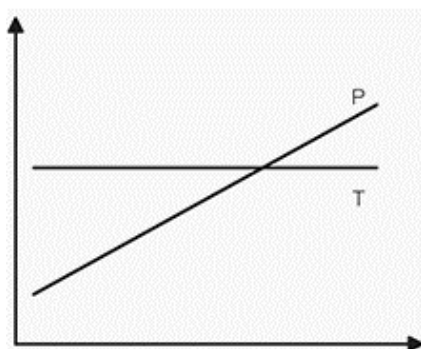


Figura 33: Carico a Coppia Costante

Un tipo di carico di coppia costante è tipico quando vengono gestiti i volumi fissi. Possiamo trovare questo tipo di carico nei compressori a vite, alimentatori e trasportatori. Quando la coppia è costante, la potenza è linearmente proporzionale alla velocità.

### 2. Coppia quadratica

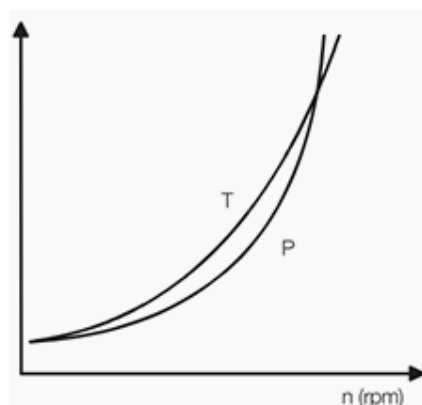


Figura 34: Carico Coppia Quadratica

La coppia quadratica è il tipo di carico più comune. Le applicazioni tipiche sono pompe e ventilatori centrifughi. La coppia ha un andamento quadratico e la potenza ha un andamento cubico ed è proporzionale alla velocità.

### 3. Potenza costante

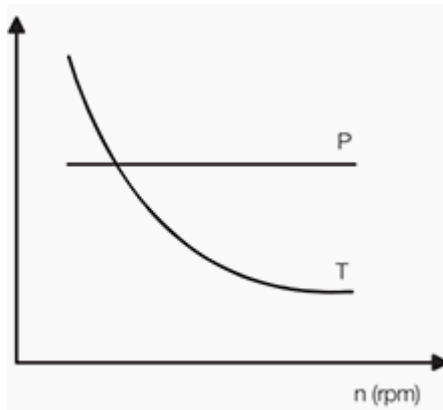


Figura 35: Carico Potenza Costante

Una curva di carico a potenza costante è tipica dei laminatoi. Quando il materiale viene laminato e il diametro cambia durante il rotolamento, è necessario mantenere la potenza costante. La coppia è inversamente proporzionale alla velocità.

### 4. Potenza / coppia costanti

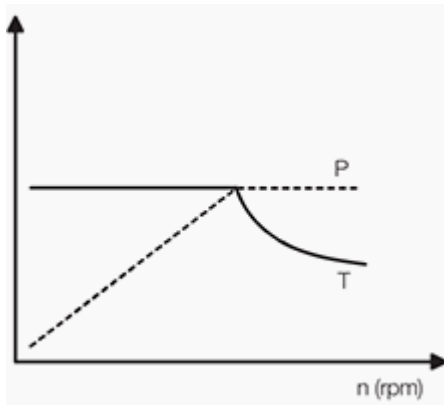


Figura 36: Carico Combinato

Questo tipo di carico è comune nell'industria della carta.

È una combinazione di curve a potenza costante e a coppia costante. Questo tipo di carico è spesso una conseguenza della necessità di ottenere una elevata potenza ad alta velocità.

### 5. Richiesta di coppia di avviamento

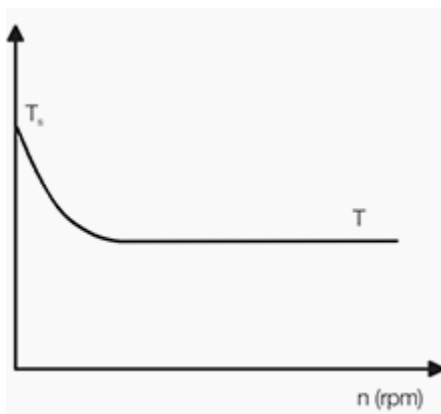


Figura 37: Carico con Elevata Coppia di Avviamento

Si trova spesso in applicazioni dove è richiesta una coppia elevata a basse frequenze.

Le applicazioni tipiche per questo tipo di carico sono ad esempio estrusori e pompe a vite.



Verrà analizzato il caso di un motore elettrico M63 0,55 kW 2 poli collegato ad una ventola utilizzata in un forno. È uno dei casi più interessanti da studiare per via del tipo di carico quadratico e per il suo comune uso in vari campi.

Di seguito abbiamo la curva di coppia/velocità:

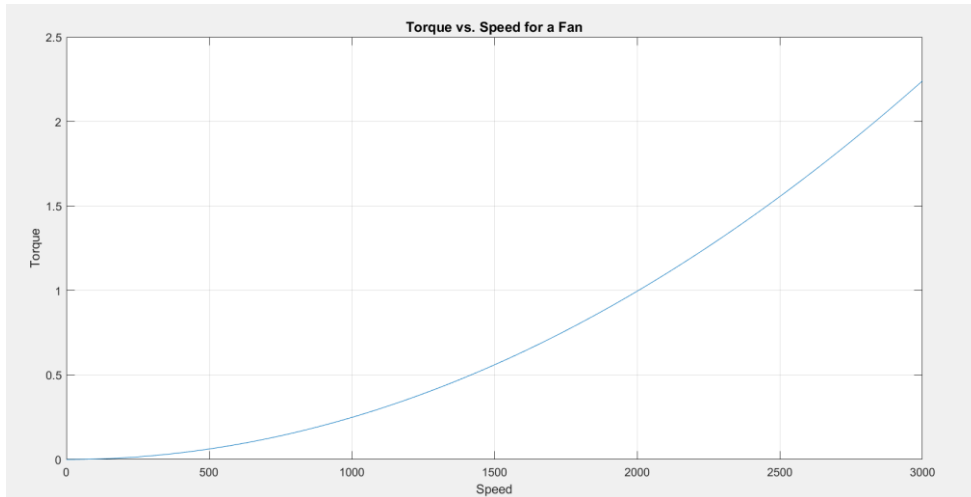


Figura 38: Coppia vs. Velocità Motore Collegato a ventola

Questa funzione andrà utilizzata per definire il carico in ingresso al motore ad induzione attraverso la porta Tm. Per legare la coppia al numero di giri si è fatto in modo che la coppia fosse proporzionale alla velocità in uscita dal motore. La velocità, posta in retroazione e moltiplicata per una costante, ci restituisce il valore di Tm secondo questa relazione:

$$T_m = speed^2 * C$$

Dove C è pari al rapporto tra coppia e velocità al quadrato, costante in ogni punto del grafico.

Il modello utilizzato per una prima prova è stato il seguente:

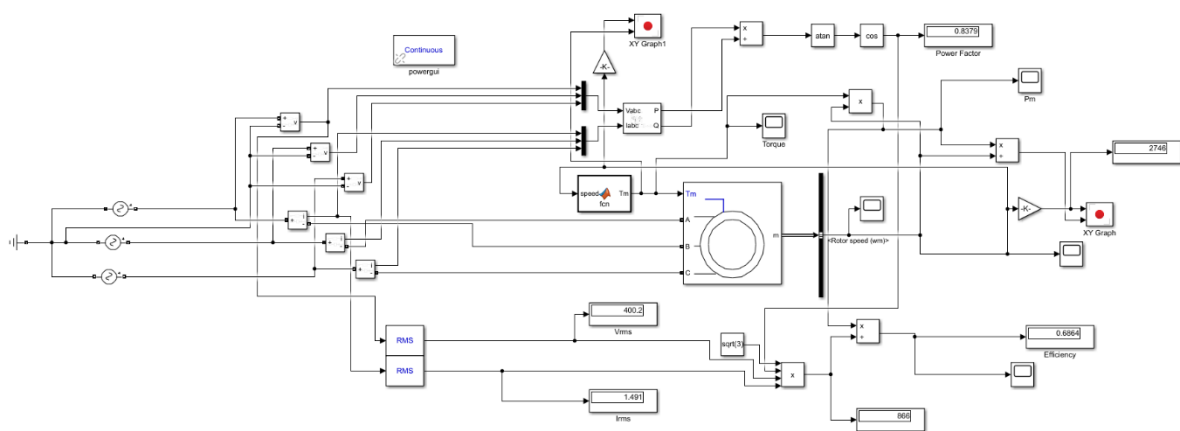


Figura 39: Secondo Modello Energetico Motore a Induzione

Nel modello iniziale il motore è direttamente collegato a rete, e si osserva un solo transitorio, presente negli istanti iniziali, quando il motore passa da una velocità nulla alla velocità di regime, intorno ai 2750 rpm.

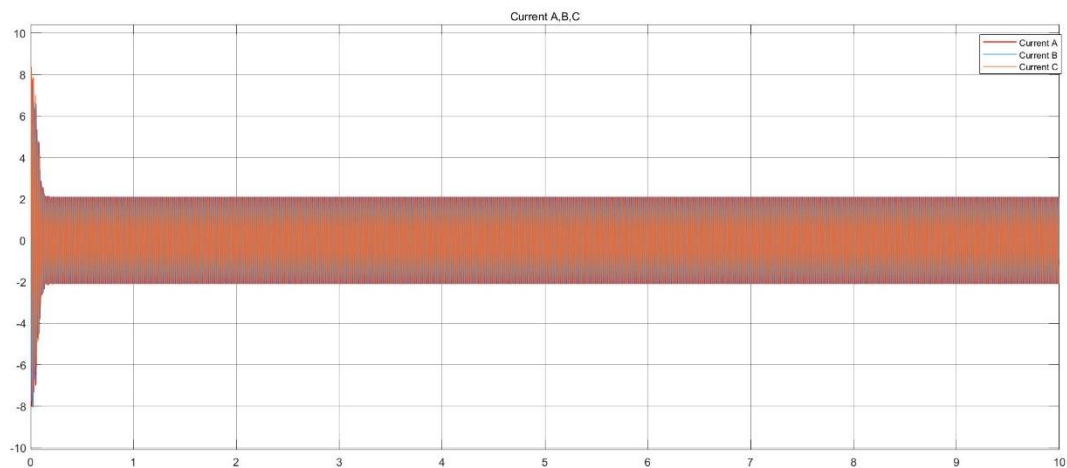
In questa configurazione si possono stimare i parametri relativi ad un motore M63C2-0,55kW-V230/400-50Hz in servizio S1 collegato ad una ventola.

I parametri del motore in questa configurazione, passato il transitorio di avviamento, si attestano ai seguenti valori:

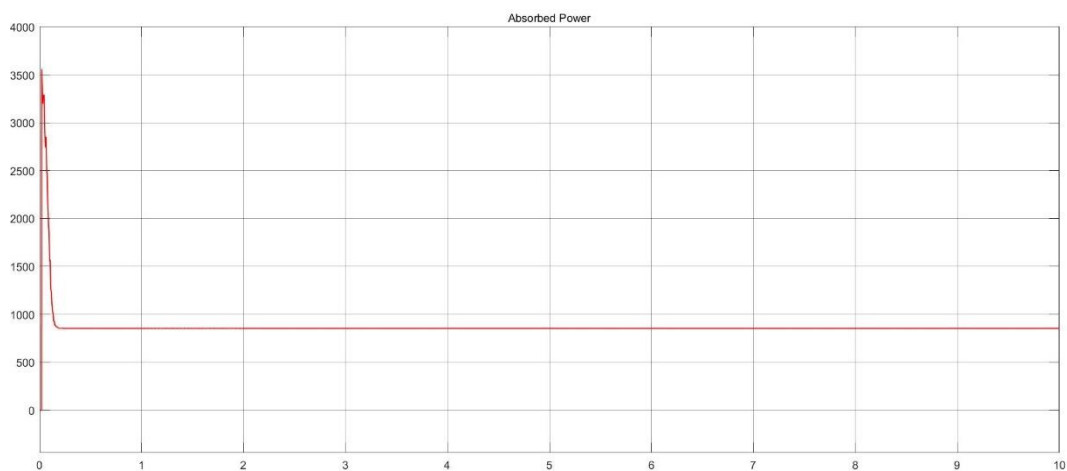
Coppia	Pm	Rendimento	Im	Vm	PF	Giri
2,1 Nm	592 W	0,694	1,48 A	399,5 V	0,83	2743

Tabella 4: Dati Prima Simulazione M63C2 collegato a ventola

Dal grafico che mostra la corrente assorbita possiamo ricavare il dato della corrente di spunto che ha un valore RMS pari a 5,4 A.



Si può andare ad osservare l'andamento della potenza assorbita, che dopo il transitorio si attesta su un valore pari a 0,855 kW:



Si è andati poi ad osservare un caso più interessante, andando a simulare una ventola che viene accesa e spenta ripetutamente.

Il carico utilizzato è lo stesso utilizzato in precedenza, ossia la curva di coppia quadratica tipica di una ventola (o di pompe centrifughe).

In questo caso si è andati a modificare il modello iniziale andando a rendere le sorgenti di tensione controllabili. I dati forniti in entrata alla funzione sono i valori tipici che definiscono una sorgente sinusoidale, ossia voltaggio, frequenza e periodo. In uscita abbiamo invece le tre fasi R,S,T.

La sorgente è controllata dalla funzione che segue:

```
function [R,S,T] = fcn(t,v,f)
w=2*pi*f;
if t<4
    R=v*sin(w*t);
    S=v*sin(w*t+(2*pi)/3);
    T=v*sin(w*t-(2*pi)/3);
elseif (4<=t) && t<7
    R=0;
    S=0;
    T=0;
else (7<=t) && t<10
    R=v*sin(w*t);
    S=v*sin(w*t+(2*pi)/3);
    T=v*sin(w*t-(2*pi)/3);
end
```

La sorgente, quindi, viene sostituita dalla seguente:

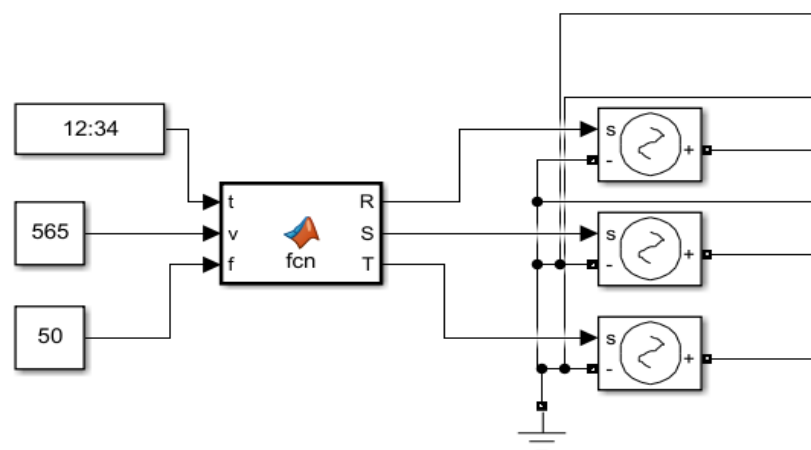


Figura 40: Sorgente Programmabile Motore a Induzione

Il modello usato in questa simulazione si presenta dunque nel seguente modo:

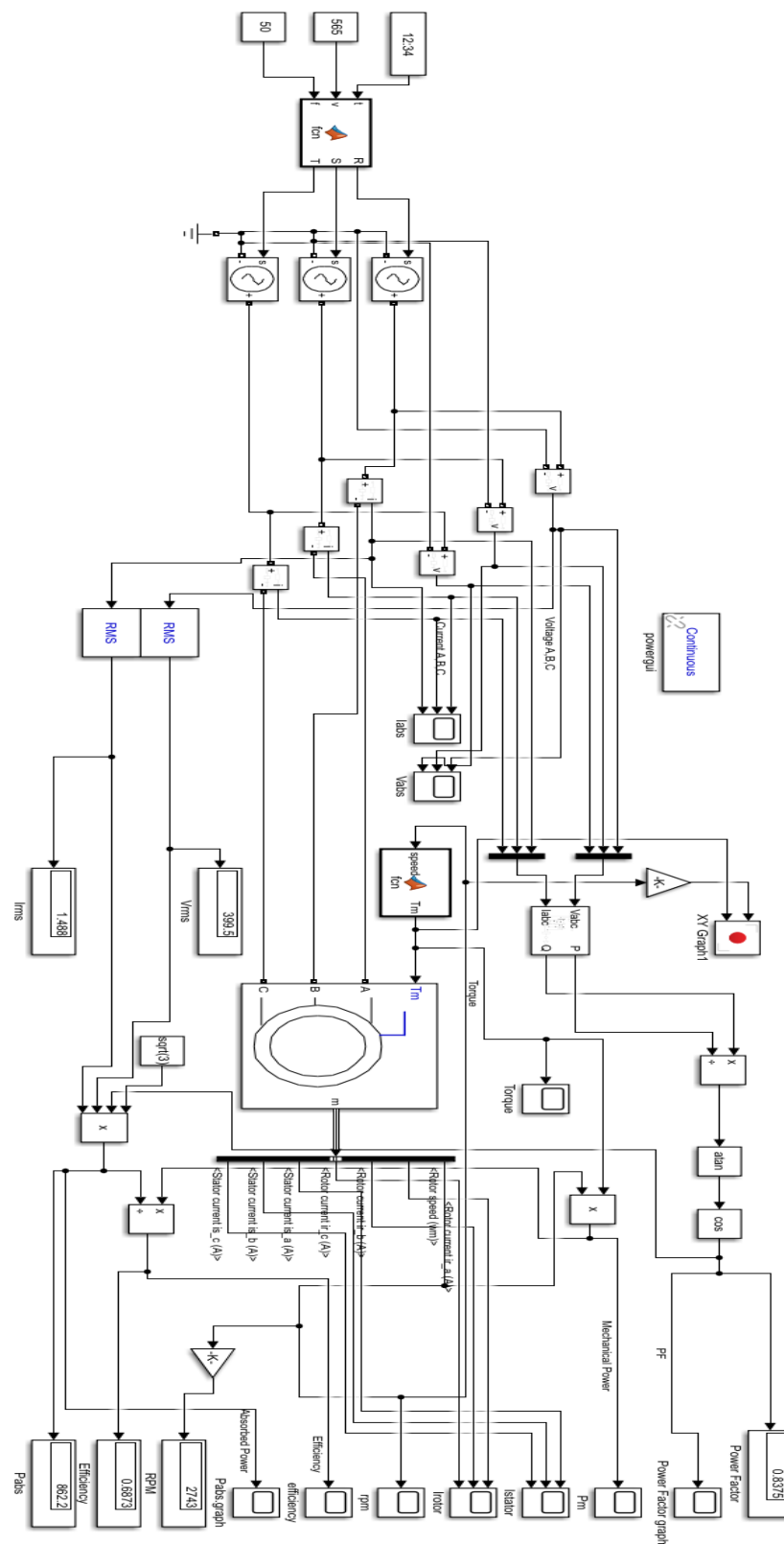


Figura 41: Terzo Modello Energetico Motore a Induzione

## 4. CAPITOLO

### ANALISI DEI RISULTATI & CONCLUSIONI

#### Risultati & Analisi dei Risultati

Nel primo intervallo di tempo compreso tra zero e quattro secondi il generatore di corrente si comporta analogamente al primo caso, con tre correnti sinusoidali in uscita il cui comportamento può essere osservato attraverso uno scope, blocco Simulink che ci permette di visualizzare la funzione scritta precedentemente:

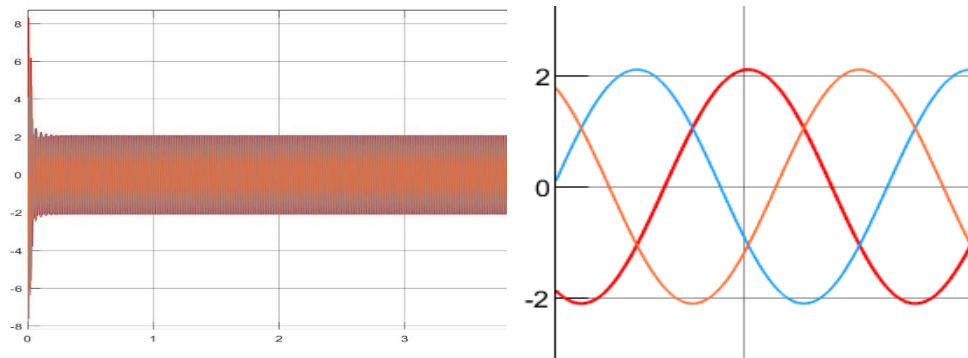


Figura 42: Corrente Assorbita Avviamento

L'andamento della corrente trifase prima che il motore venga spento rappresenta una prima fase transitoria fino a 0,5 secondi dopo l'accensione del motore, per poi stabilizzarsi quando il motore raggiunge la velocità di regime.

Tramite l'utilizzo di 'pick finder' possiamo osservare come la corrente assorbita in avviamento raggiunga un valore istantaneo pari a 8,39 A, al quale corrisponde un valore di  $I_{rms}$  pari a 5,93 A. Questo valore corrisponde al valore della corrente di spunto.

#### - Analisi dei risultati

Di seguito possiamo visualizzare l'andamento durante tutto il periodo di simulazione, pari a dieci secondi. In questo caso possiamo vedere più fasi transitorie: all'avvio, al primo spegnimento e al secondo avvio.

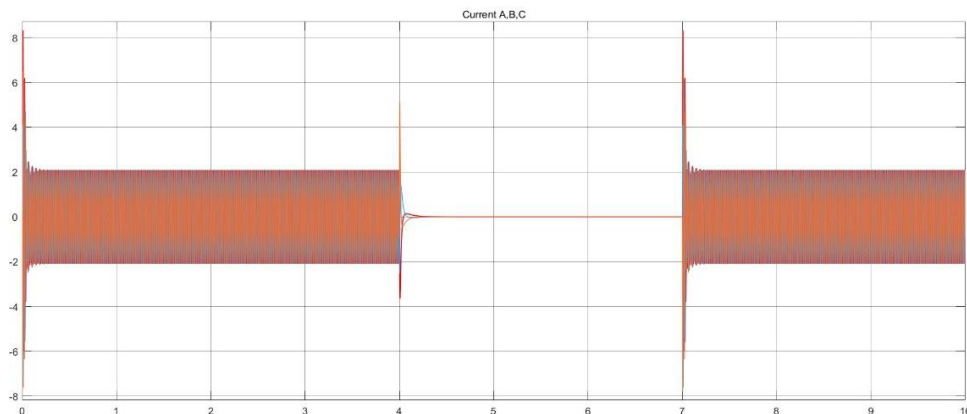


Figura 43: Corrente Assorbita Motore Collegato a Ventola

Tra lo spegnimento e il secondo avvio, osserviamo la corrente assorbita:

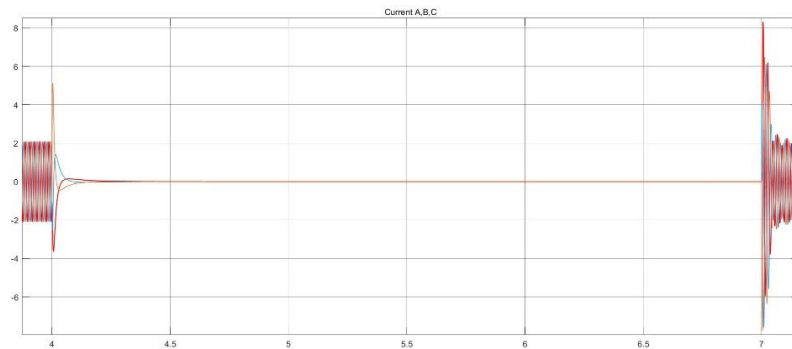


Figura 44: Zoom Corrente Assorbita Motore Collegato a Ventola

Anche in questo caso si possono andare a visualizzare i valori delle correnti assorbite durante spegnimento e seguente riavvio. L'andamento delle correnti sul rotore è invece rappresentato sul seguente grafico, dove possiamo osservare singolarmente ogni fase:

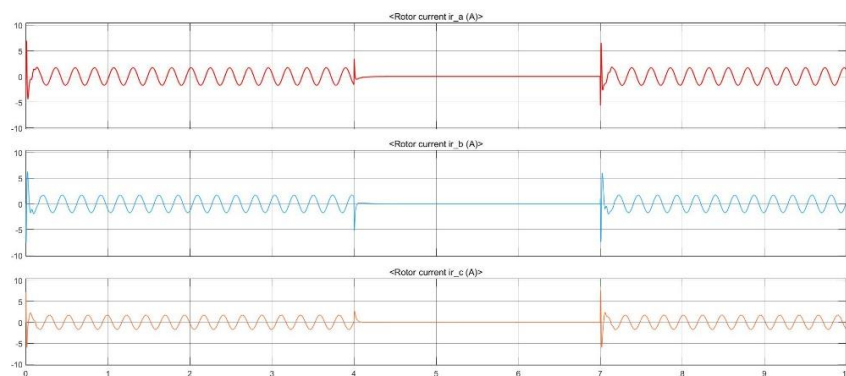


Figura 46: Corrente di Rotore Motore Collegato a Ventola

Lo spegnimento del motore provoca, ovviamente, anche una variazione nella curva di coppia e di potenza meccanica, che possono essere osservati nello stesso modo utilizzato in precedenza:

Curva di Coppia:

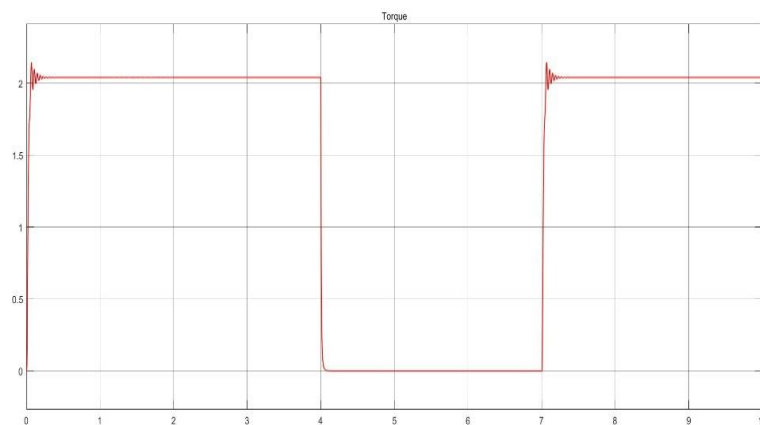


Figura 47: Andamento Coppia Motore Collegato a Ventola

### Curva di Potenza:

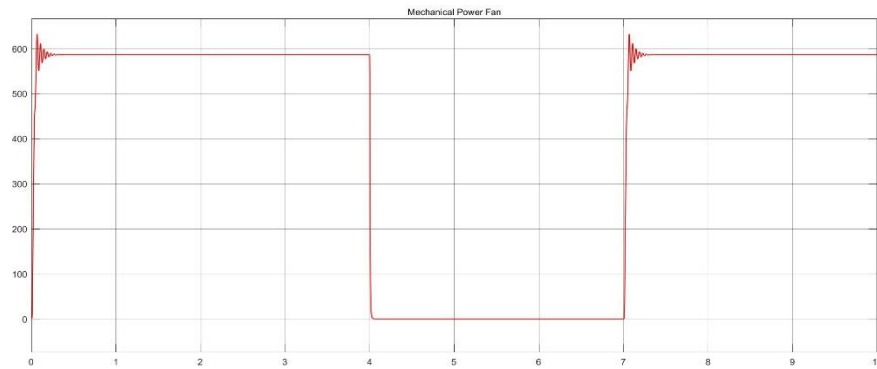


Figura 48: Potenza Meccanica Motore Collegato a Ventola

L'andamento di Coppia e Potenza nel tempo è all'incirca analogo, viene raggiunto il valore di regime sempre dopo circa 0,5 secondi come nel caso delle correnti.

Anche la curva relativa alla Potenza Assorbita risulta interessante: qui possiamo osservare il transitorio della potenza: il motore arriva ad assorbire fino ad un valore pari a 3,604 kW ad un istante di tempo di 0,021 secondi, per poi stabilizzarsi ad un valore di 0,862 kW.

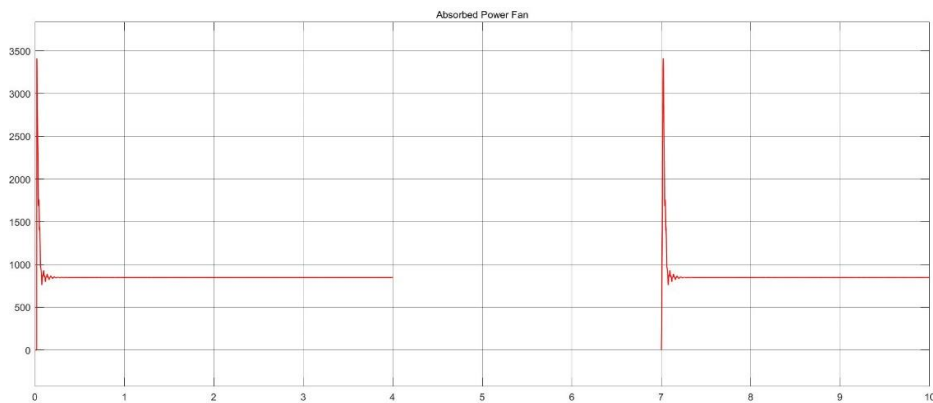


Figura 49: Potenza Assorbita Motore Collegato a Ventola

È possibile anche osservare la potenza dissipata:

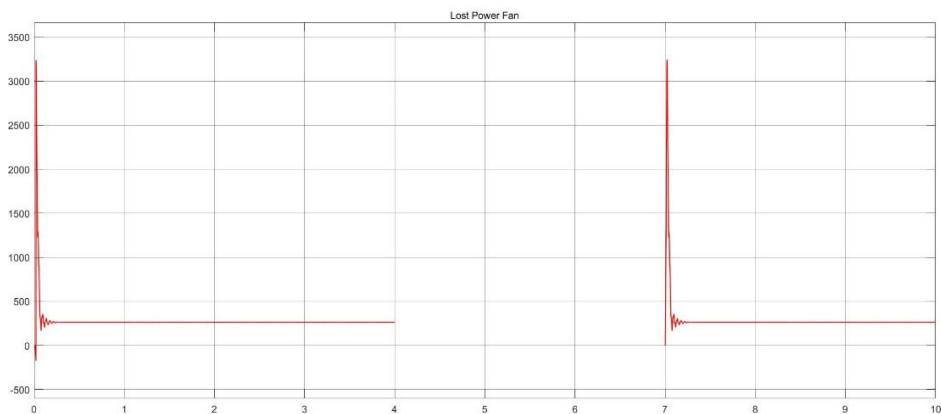


Figura 50: Potenza Dissipata Motore Collegato a Ventola



Osserviamo l'efficienza che, passato il transitorio, si attesta ad un valore di 0,687:

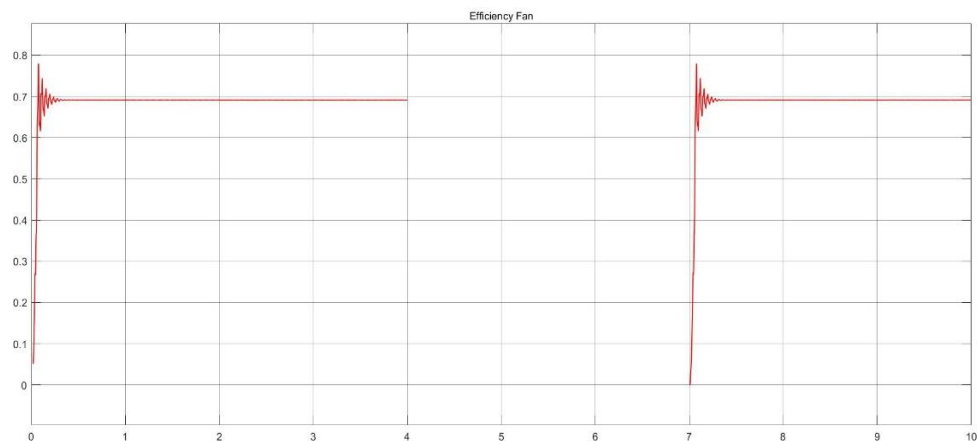


Figura 51: Efficienza Motore Collegato a Ventola

Il transitorio nel fattore di potenza è decisamente più evidente. Il valore del fattore di potenza si attesta dopo 0,5 secondi ad un valore pari a 0,837:

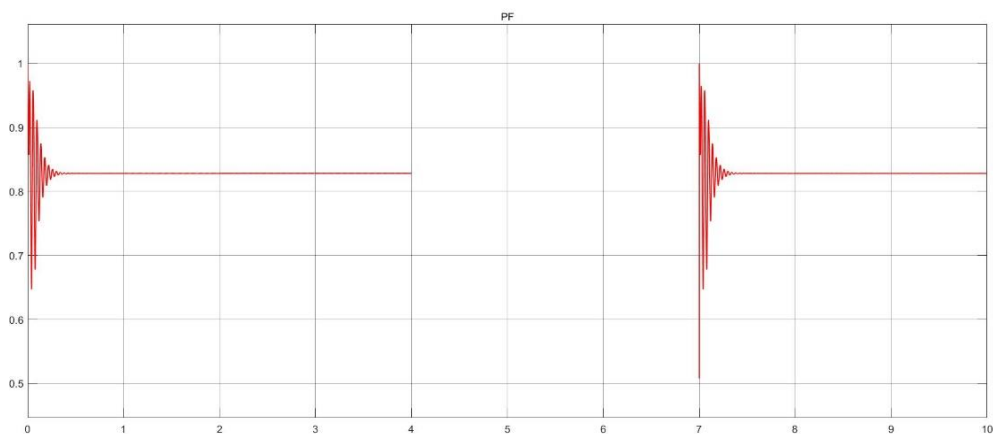


Figura 52: Fattore di Potenza Motore Collegato a Ventola

Andamento della velocità del rotore nel tempo:

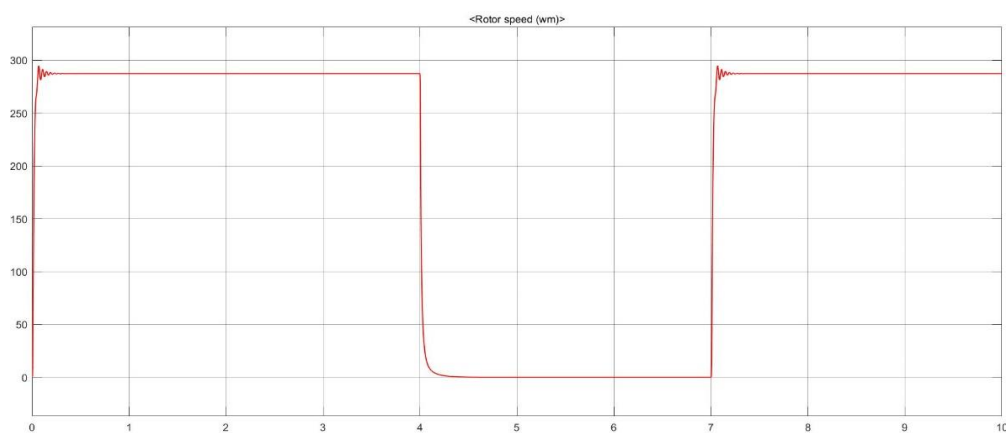


Figura 53: Velocità Motore Collegato a Ventola

Ricapitolando, risulta evidente che la macchina raggiunge la velocità di regime dopo un transitorio di circa 0,5 s durante il quale assorbe dalla linea una corrente di valore efficace 5,93 A. A regime la macchina eroga al carico una potenza di 0,589 kW fornendo una coppia di 2,1 Nm a una velocità angolare di 287,3 rad/s, ovvero 2744 giri/min, e assorbendo dalla linea una corrente di valore efficace di 1,49 A.

Possiamo andare a confrontare i parametri rilevati in questo caso con i valori rilevati durante un servizio S1:

In primis, viene considerato il valore della potenza assorbita dal motore nelle due diverse configurazioni. Nel caso del motore collegato alla ventola abbiamo una potenza assorbita di poco più alta durante il primo transitorio, ma abbiamo assorbimento generico molto più alto per via dello spegnimento e accensione del motore.

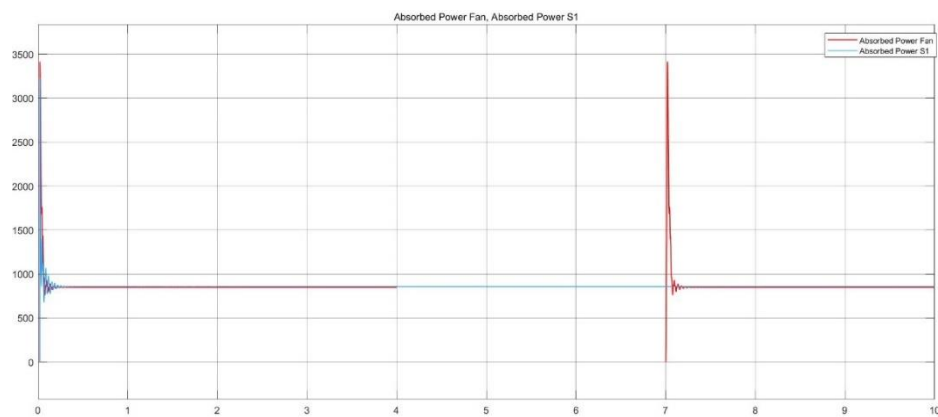


Figura 54: Confronto Potenza Assorbita Motore S1 vs. Motore Collegato a Ventola

Si è andati a considerare il valore di potenza dissipata nel caso di un servizio S1 e nel caso del ciclo reale considerato in precedenza. La differenza tra i due casi è, come da aspettative, molto visibile. Il motore collegato alla ventola, inoltre, dissipa potenza per una seconda volta durante il secondo avvio del motore, causando una perdita totale decisamente maggiore rispetto ad un motore in servizio S1.

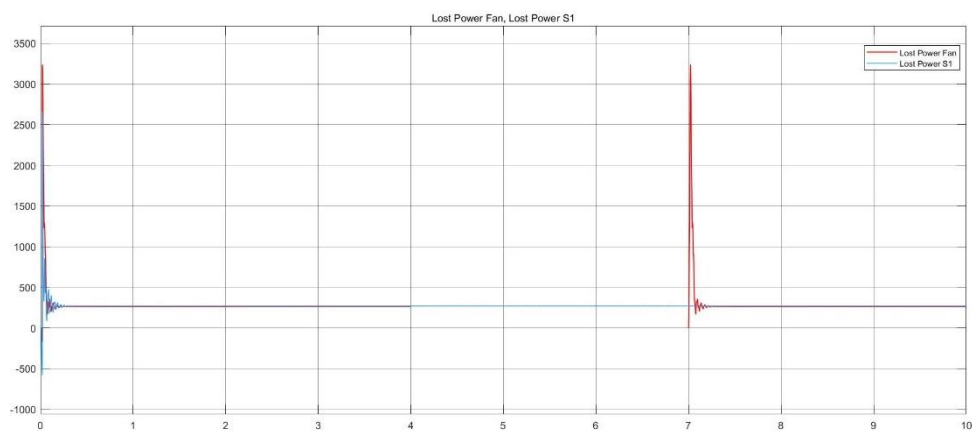


Figura 55: Confronto Potenza Dissipata Motore S1 vs. Motore Collegato a Ventola

L'ultimo parametro che andiamo a confrontare è l'efficienza, che per il motore in servizio S1 dopo il transitorio si attesta su un valore pari a 0,74. Per il motore collegato alla ventola, invece, il valore è pari a 0,69.

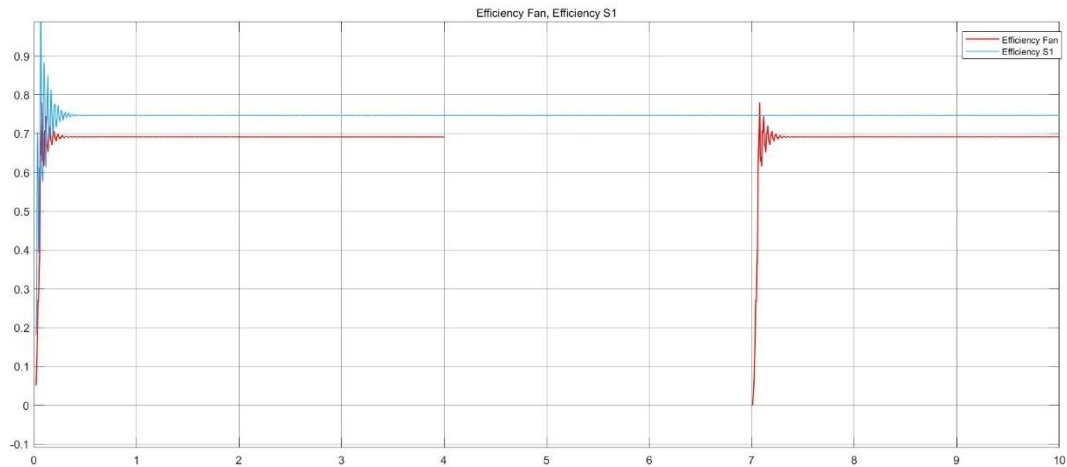


Figura 56: Confronto Efficienza Motore S1 vs. Motore Collegato a Ventola

#### - Calcolo Energia Assorbita

Il valore di potenza assorbita dal motore nelle due configurazioni è particolarmente interessante da calcolare, poiché rende velocemente l'idea del maggiore consumo di una configurazione rispetto ad un'altra. L'area sottesa al grafico, inoltre, rappresenta l'energia assorbita:

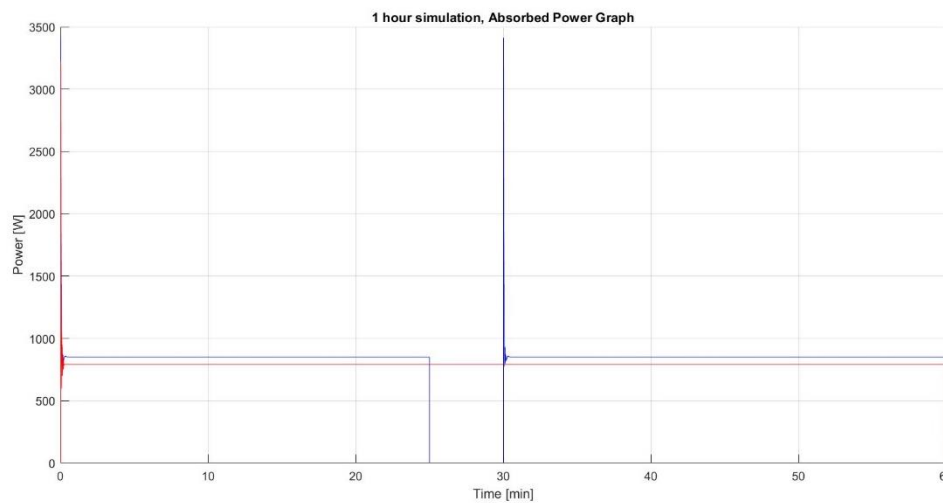


Figura 57: Confronto Potenza Assorbita (1 ora simulazione) Motore S1 vs. Motore Collegato a Ventola

Si è deciso di simulare un funzionamento S1 di 1 ora, dove il motore collegato alla ventola viene invece acceso per 25 minuti, spento per 5 minuti e riavviato per altri 30 minuti.

Siccome la potenza assorbita non è definita da una precisa funzione ma da una successione di punti, si è andati a calcolare l'integrale sotto la curva tramite l'approssimazione di questa curva a una successione di punti finita:

**%grafico potenza assorbita motore collegato a ventola**

```
x3 = [0 0.019 0.02 0.04 0.045 0.052 0.054 0.06 0.075 0.1 0.125 0.13 0.15
0.2 0.3 0.5 24.9999 25];
y3 = [0 0 3413 1650 1762 1400 1410 1435 964 775 932 800 875 820 860 850
850 0 ];
x4 = [30 30.019 30.02 30.04 30.045 30.052 30.054 30.06 30.075 30.1
30.125 30.13 30.15 30.2 30.3 30.5 59.99 60];
y4 = [0 0 3413 1650 1762 1400 1410 1435 964 775 932 800 875 820 860 850
850 0 ];
figure(2)
hold on, grid on
plot(x3,y3,'blue');
plot(x4,y4,'blue');
A1=60*trapz(x3,y3);
B1=60*trapz(x4,y4);
disp(A1+B1);
```

**%grafico potenza assorbita motore in servizio S1**

```
x5 = [0 0.019 0.02 0.04 0.045 0.053 0.056 0.075 0.086 0.1 0.116 0.13
0.148 0.156 0.186 0.21 0.217 0.25 59.99 60];
y5 = [0 0 3223 800 1385 1000 1067 600 1037 700 951 700 855 860 750 822
780 792 792 0];
hold on, grid on
plot(x5,y5,'red');
C1=60*trapz(x5,y5);
disp(C1);
```

$A1 + B1 = 2.8093e+06 \text{ [J]} = 0,78 \text{ kWh}$

$C1 = 2.8521e+06 \text{ [J]} = 0,792 \text{ kWh}$

Il valore di potenza dissipata come quella assorbita non è definito da una precisa funzione. È stato quindi eseguito lo stesso calcolo effettuato in precedenza, andando ad approssimare l'andamento del grafico come l'unione di una successione finita di punti:

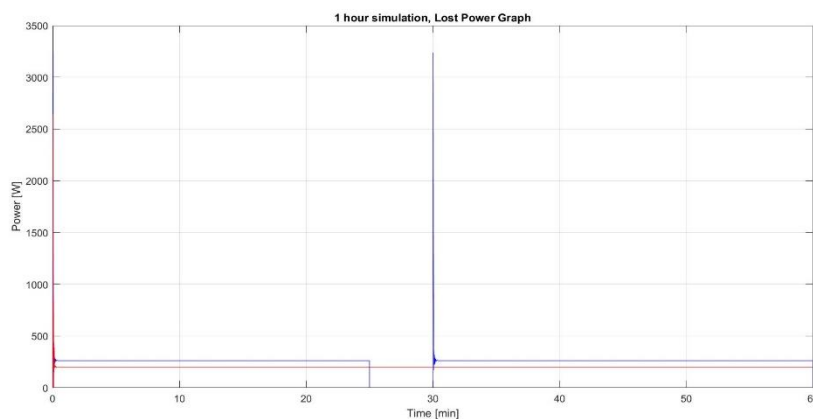


Figura 58: Confronto Potenza Dissipata (1 ora simulazione) Motore S1 vs. Motore Collegato a Ventola

Anche in questo caso la simulazione è durata lo stesso tempo della precedente:

```
%grafico potenza dissipata motore collegato a ventola
x = [0 0.02 0.04 0.045 0.051 0.053 0.08 0.09 0.11 0.12 0.15 0.17 0.19
0.21 0.26 0.33 0.4 24.9999 25];
y = [0 3238 1250 1292 870 907 170 360 220 320 230 290 245 280 255 270
262 262 0];
x2 = [30 30.02 30.04 30.045 30.051 30.053 30.08 30.09 30.11 30.12 30.15
30.17 30.19 30.21 30.26 30.33 30.4 59.9999 60];
y2 = [0 3238 1250 1292 870 907 170 360 220 320 230 290 245 280 255 270
262 262 0];
figure(1)
grid on
plot(x,y,'blue');
hold on, grid on
plot(x2,y2,'blue');
A = 60*trapz(x,y);
C = 60*trapz(x2,y2);
disp(A+C);

%grafico potenza dissipata motore in servizio S1
hold on, grid on
x1 = [0 0.025 0.026 0.04 0.065 0.086 0.09 0.1 0.12 0.14 0.15 0.17 0.22
0.27 0.4 0.41 60];
y1 = [0 0 2642 250 841 0 439 150 390 200 230 190 210 195 205 200 200];
plot(x1,y1,'red');
B = 60*trapz(x1,y1);

disp(B);

A+C = 8.7506e+05 [J] = 0.243 [kWh]

B = 7.2190e+05 [J] = 0.2 [kWh]
```

Ottenendo i seguenti risultati:

Energia	Motore in servizio S1	Motore collegato a ventola
Assorbita	0,79 kWh	0,78 kWh
Dissipata	0,2 kWh	0,245 kWh

Tabella 5: Tabella Energia Dissipata/Assorbita M63C2 collegato a ventola

## Uso nelle aziende

Come noto, la corrente assorbita durante l'avviamento dei motori asincroni si mantiene inizialmente elevata e di entità pressoché indipendente dal carico fino al raggiungimento della velocità corrispondente alla coppia massima; dopo di che diminuisce divenendo dell'ordine della corrente nominale quando la macchina raggiunge velocità prossime alla velocità nominale.

Grazie ai risultati ottenuti in precedenza, possiamo visualizzare il dato della corrente di spunto e grazie a tale dato andare a valutare se avviare il motore a tensione nominale o a tensione ridotta.

Tramite l'utilizzo del modello energetico oggetto di questa tesi, si può andare a calcolare questo parametro con molta precisione. Si può, quindi, capire l'importanza del modello energetico oggetto di questa tesi, il quale elimina molte delle incertezze relative all'assorbimento che si possono avere in una prima fase di progettazione.

Il lavoro svolto è di grande utilità alle aziende, per la progettazione di motori asincroni, e anche per gli utilizzatori, che possono così visualizzare le prestazioni del motore nelle condizioni di utilizzo della specifica applicazione di interesse.

Un primo utilizzo all'interno delle aziende è proprio relativo alla corrente di spunto: nel caso la corrente di spunto fosse troppo alta e determinasse un assorbimento troppo elevato si può dunque pensare di ridurre l'entità della corrente di avviamento, alimentando il motore a tensione ridotta fino al raggiungimento di una velocità prossima alla nominale. Una delle tecniche di avviamento a tensione ridotta più diffuse è quella della commutazione stella triangolo.

La corrente di spunto, inoltre, non è l'unico valore ricavabile dal modello energetico. Un altro valore particolarmente importante è il fattore di potenza (Power Factor), il quale può essere osservato e si può osservare come varia al variare della curva di coppia. Durante la fase di progettazione anche questo valore è di importanza fondamentale: è auspicabile che questo parametro sia vicino ad 1, poiché un  $\cos(\varphi)$  di valore unitario significa che la potenza apparente corrisponde alla potenza attiva e la potenza reattiva è nulla. Poiché la potenza reattiva è sempre indesiderata, un valore di  $\cos(\varphi)$  è tanto più indesiderato quanto più si discosta da uno.

Come visto in precedenza, un altro parametro fondamentale è l'energia assorbita: grazie al modello energetico e Matlab possiamo ottenere i grafici relativi a potenza assorbita in maniera molto semplice e veloce. Calcolando il valore dell'area sottesa alla curva si ottiene il valore dell'energia assorbita durante tutta la simulazione.

Analogamente si possono calcolare anche i valori di energia dissipata ed emessa.

Si può, ovviamente, anche variare il tempo di simulazione, ottenendo grafici di potenza differenti, per calcolare l'energia dissipata, emessa e assorbita in un motore in qualsiasi tipo di servizio.

## SITOGRAFIA

Sito Ufficiale Barrascarpetta, Voce *Prove a vuoto e Rotore Bloccato*:

[http://www.barrascarpetta.org/m\\_02/207\\_v\\_cc.htm](http://www.barrascarpetta.org/m_02/207_v_cc.htm)

Sito Ufficiale Bauer Gears, Voce *Risorse di Efficienza Energetica*:

<https://www.bauergears.com/it-IT/energy-efficiency/energy-efficiency-resources>

Sito Ufficiale Bauer Gears, Voce *Introduzione all'Efficienza Energetica*:

<https://www.bauergears.com/it-IT/energy-efficiency/introduction-to-energy-savings>

Sito Ufficiale Bauer Gears, Voce *Classi di Efficienza*:

<https://www.bauergears.com/it-IT/energy-efficiency/efficiency-classes>

Sito Ufficiale Cantoni Group, Voce *Efficienza Energetica*:

<https://www.cantonigroup.com/elektropol/it/page/efficienza-energetica>

Sito Ufficiale Crushtymks, Voce *Most Common Motor Load Types*:

<https://crushtymks.com/it/electric-motor/206-5-most-common-motor-load-types.html>

Sito Ufficiale Edutecnica, Voce *Motore Asincrono Trifase*:

<http://www.edutecnica.it/elettrotecnica/mat/mat.htm>

Sito Ufficiale Electroyou, Voce *Transitori di Avviamento*:

[https://www.electroyou.it/vis\\_resource.php?section=RP&id=92](https://www.electroyou.it/vis_resource.php?section=RP&id=92)

Sito Ufficiale Infhtub, Voce *Prova a vuoto di un motore asincrono*:

<https://www.infhtub.com/tecnica/elettrotecnica/Prova-a-vuoto-di-un-motore-asi62399.php>

Sito Ufficiale Ndr S.R.L, Voce *Collegamenti Stella – Triangolo*:

<https://www.ndr.it/collegamento-a-stella-o-triangolo/#:~:text=Nel%20collegamento%20a%20stella%20si,una%20stella%20a%20tre%20punte.>

Sito Ufficiale Ndr S.R.L, Voce *Classi di Isolamento*:

<https://www.ndr.it/motori-elettrici-classe-h/#:~:text=Ricapitolando%3A%2040%C2%B0C%20temperatura,considerando%20il%20margine%20di%20sicurezza>



Sito Ufficiale Ndr S.R.L, Voce *Classi di Efficienza*:

<https://www.ndr.it/motori-elettrici-ie3/#~:text=La%20normativa%20che%20introduce%20gli,devono%20essere%20in%20classe%20IE3.>

Sito Ufficiale Ndr S.R.L, Voce *Motori Elettrici IE3*:

[https://www.ndr.it/motori-elettrici-ie3-obbligatori-dal-01012017/.](https://www.ndr.it/motori-elettrici-ie3-obbligatori-dal-01012017/)

Sito Ufficiale Ndr S.R.L, Voce *Normativa Alta Efficienza*:

[https://www.ndr.it/normativa-sui-motori-elettrici-ie1ie2ie3-e-ie4-come-orientarsi/.](https://www.ndr.it/normativa-sui-motori-elettrici-ie1ie2ie3-e-ie4-come-orientarsi/)

Voce Antonio Pacinotti, *Enciclopedia Treccani*:

<https://www.treccani.it/enciclopedia/antonio-pacinotti>

Voce Galileo Ferraris, *Enciclopedia Treccani*:

<https://www.treccani.it/enciclopedia/galileo-ferraris>

Voce James Clerk Maxwell, *Enciclopedia Treccani*:

<https://www.treccani.it/enciclopedia/james-clerk-maxwell>

Voce Jean Jacques Ampère, *Enciclopedia Treccani*:

<https://www.treccani.it/enciclopedia/jean-jacques-ampere>

Voce Joseph Henry, *Enciclopedia Treccani*:

<https://www.treccani.it/enciclopedia/joseph-henry>

Voce Michael Faraday, *Enciclopedia Treccani*:

<https://www.treccani.it/enciclopedia/michael-faraday>

Voce Nikola Tesla, *Enciclopedia Treccani*:

<https://www.treccani.it/enciclopedia/nikola-tesla>

Voce Thomas Edison, *Enciclopedia Treccani*:

<https://www.treccani.it/enciclopedia/thomas-edison>

Sito Ufficiale Università di Pavia, Voce *Dimensionamento di un motore asincrono*:

[http://www-9.unipv.it/dmae/costruzioni/materiale\\_didattico/Costruzioni\\_18.pdf](http://www-9.unipv.it/dmae/costruzioni/materiale_didattico/Costruzioni_18.pdf)

Sito Ufficiale Valtaro Motori S.R.L. :

<https://valtaromotori.com/it/azienda.php>

# 

<a href="#">Figura 1: M63C2 durante prova a banco</a>	7
<a href="#">Figura 2: Schema 3D motore asincrono</a>	8
<a href="#">Figura 3: Schema Stella Triangolo</a>	10
<a href="#">Figura 4: Schema Collegamento Morsettiera</a>	10
<a href="#">Figura 5: Tipi di Ventilazione</a>	14
<a href="#">Figura 6: Classificazione Metodi di Raffreddamento</a>	14
<a href="#">Figura 7: Descrizione Prima Cifra codifica IP</a>	15
<a href="#">Figura 8: Descrizione Prima Cifra codifica IP</a>	15
<a href="#">Figura 9: Correlazione tra numero di poli/rapporto L/D</a>	15
<a href="#">Figura 10: Correlazione tra numero di poli e cave rotore/statore</a>	15
<a href="#">Figura 11: Correlazione tra Potenza e Scorrimento</a>	16
<a href="#">Figura 12: Stabilimento Valtaro Motori</a>	18
<a href="#">Figura 13: Schema Collegamento Stella Triangolo</a>	19
<a href="#">Figura 14: Classi di Isolamento</a>	20
<a href="#">Figura 15: Scheda Raccolta Dati Motore Asincrono</a>	21
<a href="#">Figura 16: Selezione Tipo di Prove Win500032</a>	22
<a href="#">Figura 17: Misura Resistenza Resistance Meter</a>	22
<a href="#">Figura 18: Prova di Riscaldamento Win500032</a>	25
<a href="#">Figura 19: Dati Visualizzabili Prova di Riscaldamento</a>	25
<a href="#">Figura 20: Curva Rendimento Motori Alta Efficienza</a>	28
<a href="#">Figura 21: Scheda Tecnica Tipica Motori IE</a>	29
<a href="#">Figura 22: M63C2 durante prova a banco</a>	30
<a href="#">Figura 23: M63C2 durante prova a banco</a>	30
<a href="#">Figura 24: Raccolta Dati M63C2</a>	30
<a href="#">Figura 25: Dati di Targa M63C2</a>	30
<a href="#">Figura 26: Prova a Banco Completa M63C2</a>	31
<a href="#">Figura 27: Prova a Carico M100A4 IE2</a>	32
<a href="#">Figura 28: Raccolta Dati Aggiuntivi Motori IE</a>	32
<a href="#">Figura 29: Schema Semplificato Prova a Vuoto</a>	34
<a href="#">Figura 30: Schema Semplificato Prova a Rotore Bloccato</a>	35
<a href="#">Figura 31: Primo Modello Motore a Induzione</a>	37
<a href="#">Figura 32: Parametri Richiesti Blocco Asynchronous Machine</a>	37
<a href="#">Figura 33: Carico a Coppia Costante</a>	39
<a href="#">Figura 34: Carico Coppia Quadratica</a>	39
<a href="#">Figura 35: Carico Potenza Costante</a>	40
<a href="#">Figura 36: Carico Combinato</a>	40
<a href="#">Figura 37: Carico con Elevata Coppia di Avviamento</a>	40
<a href="#">Figura 38: Coppia vs. Velocità Motore Collegato a ventola</a>	41
<a href="#">Figura 39: Secondo Modello Energetico Motore a Induzione</a>	41
<a href="#">Figura 40: Sorgente Programmabile Motore a Induzione</a>	42
<a href="#">Figura 41: Terzo Modello Energetico Motore a Induzione</a>	43
<a href="#">Figura 42: Corrente Assorbita Avviamento</a>	44
<a href="#">Figura 43: Corrente Assorbita Motore Collegato a Ventola</a>	44
<a href="#">Figura 44: Zoom Corrente Assorbita Motore Collegato a Ventola</a>	45
<a href="#">Figura 46: Corrente di Rotore Motore Collegato a Ventola</a>	45
<a href="#">Figura 47: Andamento Coppia Motore Collegato a Ventola</a>	45
<a href="#">Figura 48: Potenza Meccanica Motore Collegato a Ventola</a>	46
<a href="#">Figura 49: Potenza Assorbita Motore Collegato a Ventola</a>	46
<a href="#">Figura 50: Potenza Dissipata Motore Collegato a Ventola</a>	46
<a href="#">Figura 51: Efficienza Motore Collegato a Ventola</a>	47
<a href="#">Figura 52: Fattore di Potenza Motore Collegato a Ventola</a>	47
<a href="#">Figura 53: Velocità Motore Collegato a Ventola</a>	47
<a href="#">Figura 54: Confronto Potenza Assorbita Motore S1 vs. Motore Collegato a Ventola</a>	48
<a href="#">Figura 55: Confronto Potenza Dissipata Motore S1 vs. Motore Collegato a Ventola</a>	48
<a href="#">Figura 56: Confronto Efficienza Motore S1 vs. Motore Collegato a Ventola</a>	49
<a href="#">Figura 57: Confronto Potenza Assorbita (1 ora simulazione) Motore S1 vs. Motore Collegato a Ventola</a>	49
<a href="#">Figura 58: Confronto Potenza Assorbita (1 ora simulazione) Motore S1 vs. Motore Collegato a Ventola</a>	50

## INDICE DELLE TABELLE

<a href="#"><u>Tabella 1: Raccolta Parametri M63C2</u></a>	36
<a href="#"><u>Tabella 2: Confronto dati prova a vuoto M63C2</u></a>	38
<a href="#"><u>Tabella 3: Confronto Dati Prova a Carico M63C2</u></a>	38
<a href="#"><u>Tabella 4: Dati Prima Simulazione M63C2 collegato a ventola</u></a>	42
<a href="#"><u>Tabella 5: Tabella Energia Dissipata/Assorbita M63C2 collegato a ventola</u></a>	52