



Ricerca di Sistema elettrico

Determinazione dell'incertezza nella misura del rendimento di motori asincroni polifase secondo i metodi prescritti dalla norma IEC 60034-2-1.

*E. Fiorucci, G. Bucci, A. Ometto,
F. Parasiliti Collazzo, M. Villani*



Università
dell'Aquila
D.I.I.E.

DETERMINAZIONE DELL'INCERTEZZA NELLA MISURA DEL RENDIMENTO DI MOTORI ASINCRONI POLIFASE
SECONDO I METODI PRESCRITTI DALLA NORMA IEC 60034-2-1.

E. Fiorucci, G. Bucci, A. Ometto, F. Parasiliti Collazzo, M. Villani (Università dell'Aquila)

Settembre 2016

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

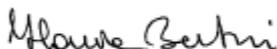
Piano Annuale di Realizzazione 2015

Area: Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici

Progetto: Potenziamento della facility per la sperimentazione e verifica di motori elettrici ad alta efficienza

Obiettivo: Efficienza energetica nel settore industria

Responsabile del Progetto: Ilaria Bertini, ENEA



Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione *"Determinazione dell'incertezza nella misura del rendimento di motori asincroni polifase secondo i metodi prescritti dalla norma IEC 60034-2-1"*.

Responsabile scientifico ENEA: ing. Maria Anna Segreto



Responsabile scientifico Unil'Aquila: prof. Edoardo Fiorucci



Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 IL CONTESTO ATTUALE INERENTE L'EFFICIENZA DEI MOTORI ASINCRONI TRIFASE.....	6
3 OSSERVAZIONI SULLA MISURAZIONE DELL'EFFICIENZA MEDIANTE IL METODO DIRETTO O LA STIMA DELLE PERDITE SEPARATE.....	11
4 OSSERVAZIONI SULLE GRANDEZZE E LE PROCEDURE DI MISURAZIONE INERENTI LA DETERMINAZIONE SPERIMENTALE DELL'EFFICIENZA DEI MOTORI ASINCRONI.....	13
5 SINTESI DELLA "GUIDA ALL'ESPRESSIONE DELL'INCERTEZZA" BIPM JCGM 100:2008 (GUM).....	15
5.1 INCERTEZZE DI CATEGORIA A.....	15
5.2 INCERTEZZE DI CATEGORIA B.....	15
5.3 CONSIDERAZIONI SULL'INCERTEZZA COMPOSTA.....	16
6 SPECIFICHE DI PRECISIONE PER LA STRUMENTAZIONE DI MISURA DA ADOTTARE.....	17
7 DETERMINAZIONE DELLE INCERTEZZE DELLE GRANDEZZE DI MISURA COINVOLTE NELLA DETERMINAZIONE DELL'EFFICIENZA.....	18
7.1 L'INCERTEZZA NELLA MISURAZIONE DELLE TEMPERATURE E DELLA RESISTENZA DEGLI AVVOLGIMENTI.....	18
7.2 L'INCERTEZZA NELLA MISURAZIONE DEL FATTORE DI CORREZIONE DELLA TEMPERATURA.....	19
7.3 L'INCERTEZZA NELLA MISURAZIONE DELLE PERDITE COSTANTI DURANTE LE PROVE A VUOTO.....	20
7.4 L'INCERTEZZA NELLA MISURAZIONE DELLE PERDITE PER ATTRITO E VENTILAZIONE.....	20
7.5 L'INCERTEZZA NELLA MISURAZIONE DELLE PERDITE NEL FERRO.....	22
7.6 L'INCERTEZZA NELLA MISURAZIONE DELLE PERDITE NEGLI AVVOLGIMENTI DI STATORE.....	23
7.7 L'INCERTEZZA NELLA MISURAZIONE DELLE PERDITE NEGLI AVVOLGIMENTI DI ROTORE.....	24
7.8 L'INCERTEZZA NELLA MISURAZIONE DELLE PERDITE ADDIZIONALI A CARICO.....	25
7.9 L'INCERTEZZA NELLA DETERMINAZIONE DELL'EFFICIENZA CON IL METODO INDIRETTO.....	27
7.10 L'INCERTEZZA NELLA DETERMINAZIONE DELL'EFFICIENZA CON IL METODO DIRETTO.....	28
8 CONFRONTO TRA LE INCERTEZZE DI CATEGORIA B OTTENIBILI SPERIMENTALMENTE CON APPROCCIO INDIRETTO E DIRETTO NELLA DETERMINAZIONE DELL'EFFICIENZA DEI MOTORI ASINCRONI: CASO STUDIO.....	28
9 CONCLUSIONI.....	51
10 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	52
11 CURRICULA.....	54

Sommario

I motori elettrici, ed i sistemi di azionamento che essi movimentano, costituiscono i carichi che assorbono la maggior quantità di energia elettrica in ambito industriale; si stima che tale ammontare sia nell'ordine tra il 43% ed il 46% del consumo elettrico globale. Studi recenti mostrano che i valori di efficienza dei motori asincroni possono essere incrementati, considerando l'importanza che tale risultato assumerebbe alla luce della normativa internazionale; nel passaggio da motori asincroni di livello di efficienza IE3 a IE4, l'ammontare complessivo delle perdite si riduce del 15-20%, a seconda del diverso numero di poli e della potenza nominale dei motori considerati.

Nel 2009, la Commissione Europea ha redatto il regolamento 640, inerente le specifiche per la progettazione eco-compatibile dei motori elettrici. In questo scenario, la determinazione sperimentale dell'efficienza dei motori asincroni sta acquisendo importanza crescente, considerando la necessità di valutarne correttamente l'incertezza, con l'obiettivo di collocare correttamente i motori all'interno dei livelli di efficienza prescritti dalle normative, con possibilità di rendere ripetibili e riproducibili le misurazioni.

E' infatti evidente che la classificazione in termini di efficienza è fortemente dipendente dalle metodologie di prova adottate per la valutazione sperimentale dell'efficienza stessa.

Nel presente documento, sono considerati ed approfonditi i diversi tipi di contributo all'incertezza di misura che si debbano quantificare nell'adozione sia del metodo indiretto che diretto della determinazione dell'efficienza dei motori asincroni trifase, in accordo con la IEC 60034-2-1. Questa attività di ricerca è stata svolta facendo principalmente riferimento alle specifiche per la valutazione dell'incertezza tipo ed alla propagazione della stessa, a partire dalle caratteristiche della strumentazione indicata dalle normative IEC, ed elaborando i contributi di incertezza secondo quanto specificato dalla Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM).

I risultati sperimentali ottenuti con la caratterizzazione di un motore asincrono sono presentati e discussi, con particolare attenzione al confronto tra le incertezze tipo ottenibili sia con metodo indiretto che diretto; dalla loro osservazione si deduce che la normativa IEC dovrebbe essere rivista, con l'opportuno inserimento di analisi e valutazioni quantitative inerenti le incertezze di misura attese ed accettabili durante le procedure di misura dell'efficienza dei motori asincroni, da affiancare alle generiche osservazioni di tipo qualitativo attualmente proposte.

Si osserva inoltre che i risultati presentati, in relazione al confronto tra le incertezze ottenute con il metodo indiretto e diretto sono del tutto generali, ed estendibili a motori di taglia anche superiore; ciò poiché si tratta di confronti tra elaborazioni di dati sperimentali ottenuti con la medesima strumentazione in entrambi i metodi proposti, e che la strumentazione sia elettrica che meccanica oggi disponibile sul mercato consente di ottenere le stesse incertezze fino a potenze dell'ordine del MW.

1 Introduzione

I motori elettrici sono ampiamente impiegati per la conversione dell'energia elettrica in energia meccanica, all'interno di sistemi di azionamento e movimentazione, dove la maggior quantità di energia è consumata dai motori stessi, mentre i circuiti ausiliari mostrano consumi limitati. Si riscontra che i motori elettrici ed i sistemi che essi movimentano costituiscono i maggiori utilizzatori finali di energia elettrica; si può stimare che essi consumino tra il 43% ed il 46% di tutta l'energia assorbita, dando luogo all'emissione di circa 6 040 Mt di CO₂ [1]. In molte applicazioni industriali, i motori elettrici consumano dal 70% all' 80% dell'energia assorbita, rappresentandone una voce importante nel bilancio.

Per quanto concerne i costi di esercizio, il consumo di energia elettrica rappresenta la voce ampiamente maggioritaria del costo di un motore elettrico. L' US Department of Energy stima che i costi in termini di energia assorbita nell'arco di 20 anni di funzionamento di un motore elettrica sia circa il 90% del totale, mentre i costi per inattività siano il 5%, i costi per le riparazioni siano il 4%; solo l'1% è costituito dal costo di acquisto di un motore elettrico [1].

Recenti studi dimostrano che i valori di efficienza dei motori a induzione può essere aumentata con successo, con miglioramenti consistenti nella riduzione delle perdite anche del 15-20%. Nel 2009, la Commissione europea ha pubblicato il regolamento (640/2009) [2], che definisce i requisiti per la progettazione ecocompatibile dei motori elettrici. In tale scenario, la determinazione sperimentale della efficienza dei motori asincroni polifase assume importanza cruciale, nella emergente necessità di collocare correttamente i motori asincroni presenti sul mercato nei livelli di efficienza energetica definiti dalle normative internazionali.

Nella determinazione del rendimento del motore asincrono polifase, il risultato ottenuto non può essere considerato a prescindere dall'incertezza ad esso associata, che risulta essere necessaria per collocare il motore testato nella classificazione di livelli di efficienza energetica definiti dalla normativa IEC 60034-30-1 [3]. L'incertezza della misura del rendimento inoltre è il dato che consente di confrontare i valori di rendimento misurati sullo stesso motore in laboratori differenti, o su diversi motori di stessa taglia nello stesso laboratorio; in questi casi senza l'espressione corretta dell'incertezza di misura del rendimento, non è possibile applicare il concetto basilare di equivalenza tra misura, in accordo con quanto prescritto da BIPM JCGM 100:2008 GUM [4]. La norma IEC 60034-2-1 [5] che definisce metodi per la determinazione delle perdite nelle macchine elettriche rotanti e dei rendimenti a partire da dati sperimentali, introduce alcuni requisiti di precisione sulla strumentazione che deve essere utilizzata nella misurazione delle grandezze elettriche, meccaniche e termiche. Tuttavia, l'espressione dell'incertezza del rendimento non viene direttamente affrontata, lasciando all'operatore che effettua le misurazioni la valutazione della stessa.

La norma IEC 61034-2-1 [5] infatti afferma che *“E' difficile stabilire regole precise per la determinazione del rendimento. La scelta del metodo di prova da utilizzare dipende dalle informazioni richieste, dalla precisione richiesta, dal tipo e dalle dimensioni della macchina interessata e dall'apparecchiatura di prova disponibile (alimentazione, carico o macchina di trascinamento). ... Il metodo di prova dovrebbe essere scelto tra le procedure con incertezza minore.”*

Inoltre, la ISO/IEC 17025 [6] prescrive che un laboratorio di taratura, o un laboratorio di prova che esegue le proprie tarature, deve avere e deve applicare una procedura per stimare l'incertezza di misura per tutte le tarature e tipi di taratura.

I laboratori di prova devono avere e devono applicare delle procedure per stimare l'incertezza di misura. In certi casi la natura dei metodi di prova può escludere il calcolo rigoroso dell'incertezza di misura, valido dal punto di vista metrologico e statistico. In questi casi il laboratorio deve almeno tentare di identificare tutte le componenti dell'incertezza e fornire una stima ragionevole, e deve assicurare che l'espressione del risultato non fornisca un'impressione errata dell'incertezza. Una stima ragionevole deve essere basata sulla conoscenza del metodo e sullo scopo della misurazione e deve far uso, per esempio, delle esperienze precedenti e della validazione dei dati.

In passato, molte osservazioni e indagini critiche sono state svolte riguardo la determinazione dell'incertezza nella misurazione dell'efficienza dei motori asincroni, da diversi gruppi di ricercatori. Alcune

tematiche in merito alla misura di efficienza in accordo con la [5] sono state indagate in [7-16]; ulteriori risultati interessanti su metodi calorimetrici per la determinazione delle perdite nella macchine elettriche sono proposti in [17-18]. Osservazioni critiche sulle perdite addizionali sono presenti in [19]. Altri aspetti sono stati individuati e studiati in [20-26].

2 Il contesto attuale inerente l'efficienza dei motori asincroni trifase

Nel 2009, la Commissione Europea ha pubblicato il nuovo regolamento (640/2009) [2] riguardante le specifiche per la progettazione eco-compatibile dei motori elettrici. In dettaglio tale regolamento si applica a motori asincroni con rotore a gabbia di scoiattolo, trifase a frequenza di 50 Hz o 50/60 Hz, con 2, 4 e 6 poli, con tensioni nominali fino a 1000 V, di potenze nominali comprese tra 0.75 e 375 kW, e progettati per funzionamento in servizio continuo. Sono proposti tre livelli di efficienza (Fig. 1):

- 1) IE2 – High Efficiency, equivalente sia al precedente Eff1 ed allo statunitense US EPAAct per i motori a 60Hz;
- 2) IE3 – Premium Efficiency, un nuovo livello per il mercato europeo ed equivalente al NEMA Premium per i motori a 60 Hz;
- 3) IE4 – Super Premium Efficiency, una nuova classe a partire dal 2013, definita in IEC 60034-30-1 [3], che include anche motori di taglia da 0.12 kW fino a 1000 kW, con 2, 4, 6 ed 8 poli.

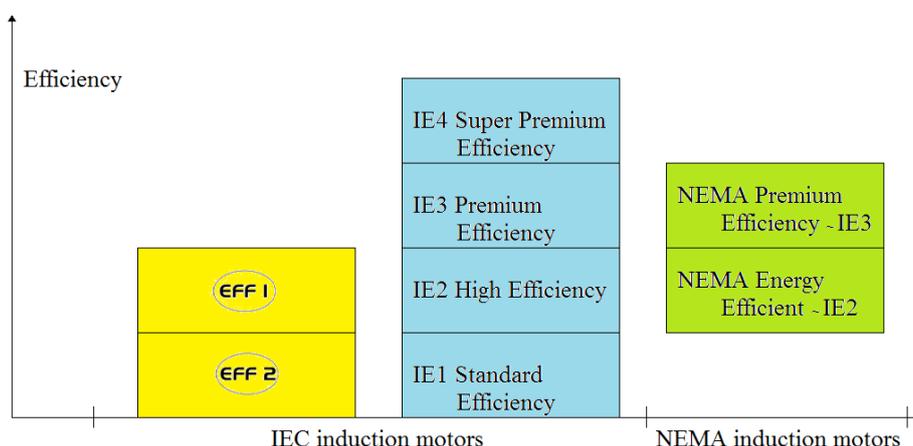


Fig. 1- Confronto qualitativo tra livelli di efficienza in ambito internazionale per motori asincroni trifase.

Inoltre, le seguenti scadenze sono state fissate, ed hanno validità obbligatoria per i diversi paesi:

- a partire dal 1 gennaio 2015 tutti i motori disponibili sul mercato di taglia compresa tra 7.5 e 375 kW devono soddisfare le specifiche dei livelli di efficienza previsti per la classe IE3; da tale data motori di stessa taglia in classe IE2 possono essere presenti sul mercato solo se dotati di inverter;
- a partire dal 1 gennaio 2017 tutti i motori disponibili sul mercato di taglia compresa tra 0.75 e 375 kW devono soddisfare le specifiche dei livelli di efficienza previsti per la classe IE3; da tale data motori di stessa taglia in classe IE2 possono essere presenti sul mercato solo se dotati di inverter;

Si stima che questa operazione di incremento dell'efficienza dei motori consenta un risparmio di 135 TWh all'anno, nel 2020.

Per meglio comprendere l'importanza degli incrementi di efficienza che sono previsti da questo quadro normativo, di seguito sono riportati in Fig. 2-5 i confronti tra i livelli di efficienza da IE1 a IE4 per motori con lo stesso numero di poli; in Fig. 6-9 sono riportati i livelli di efficienza per singola classe, per evidenziarne le differenze in base al numero di poli dei motori.

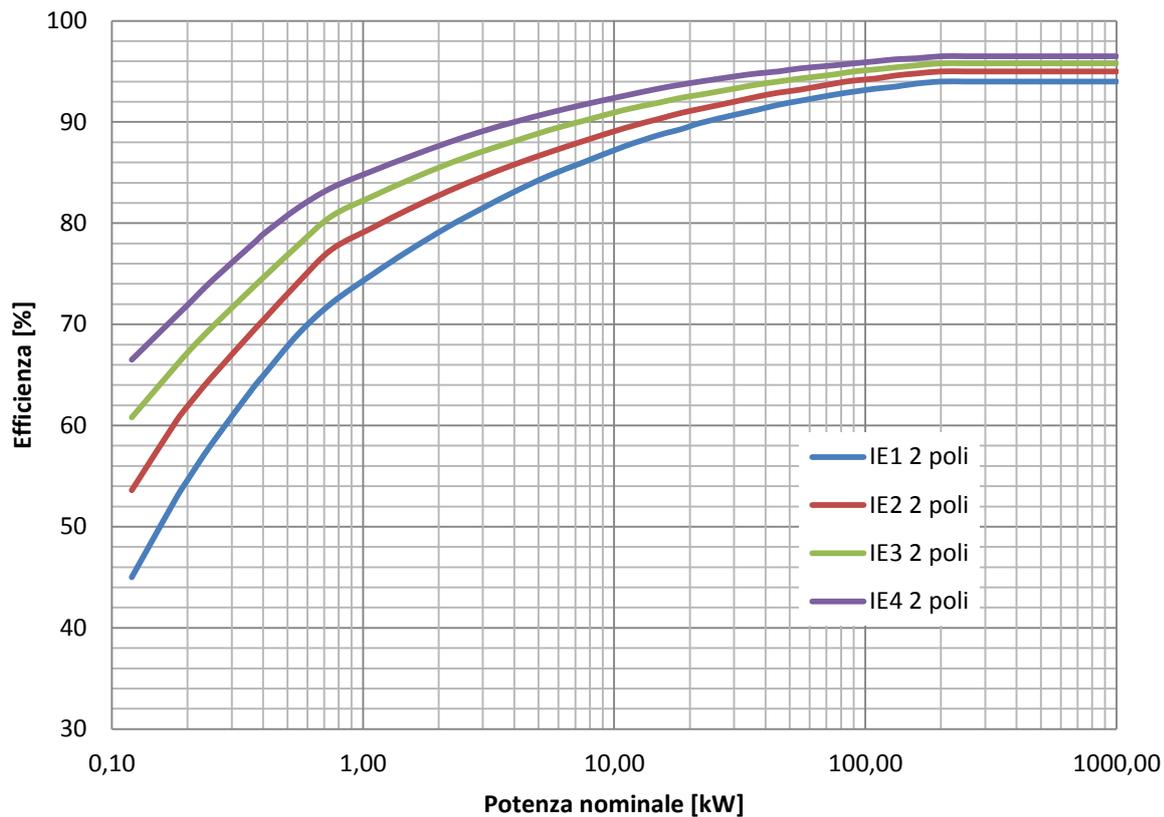


Fig. 2 – Confronto tra rendimenti IE per motori asincroni trifase a 2 poli

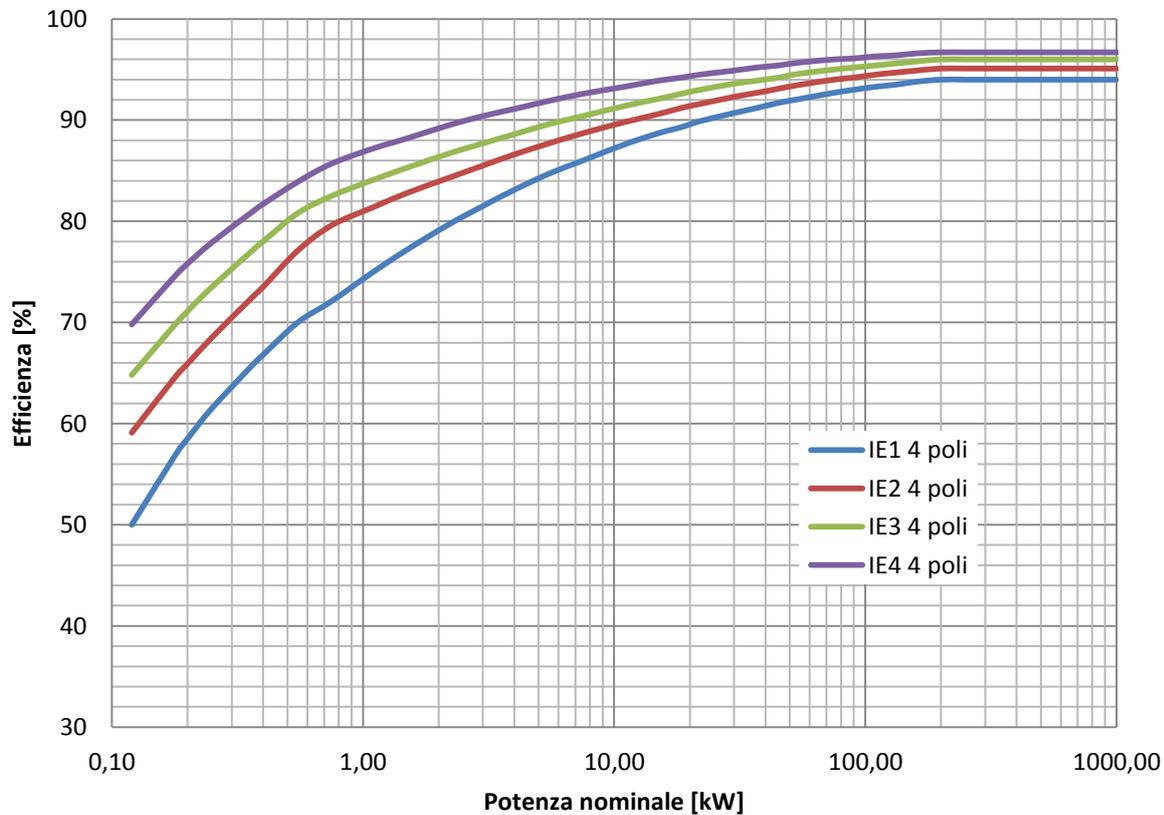


Fig. 3 – Confronto tra rendimenti IE per motori asincroni trifase a 4 poli

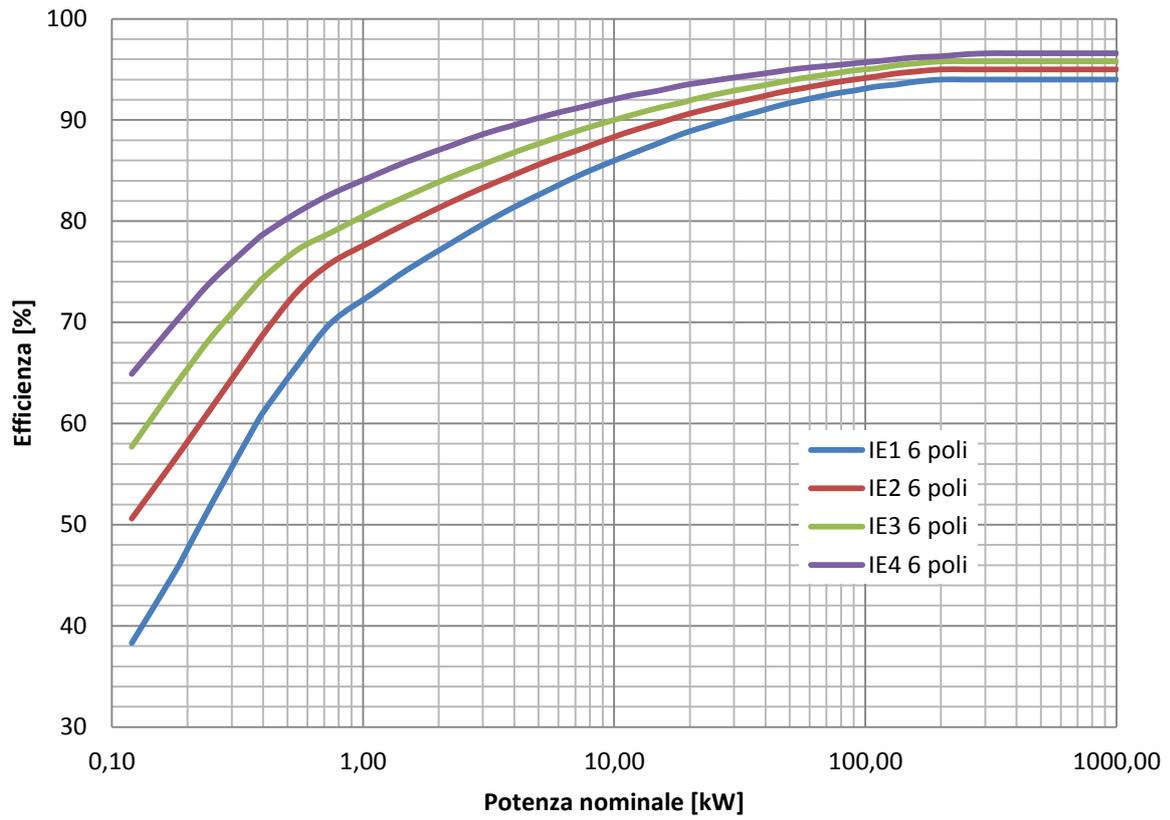


Fig. 4 – Confronto tra rendimenti IE per motori asincroni trifase a 6 poli

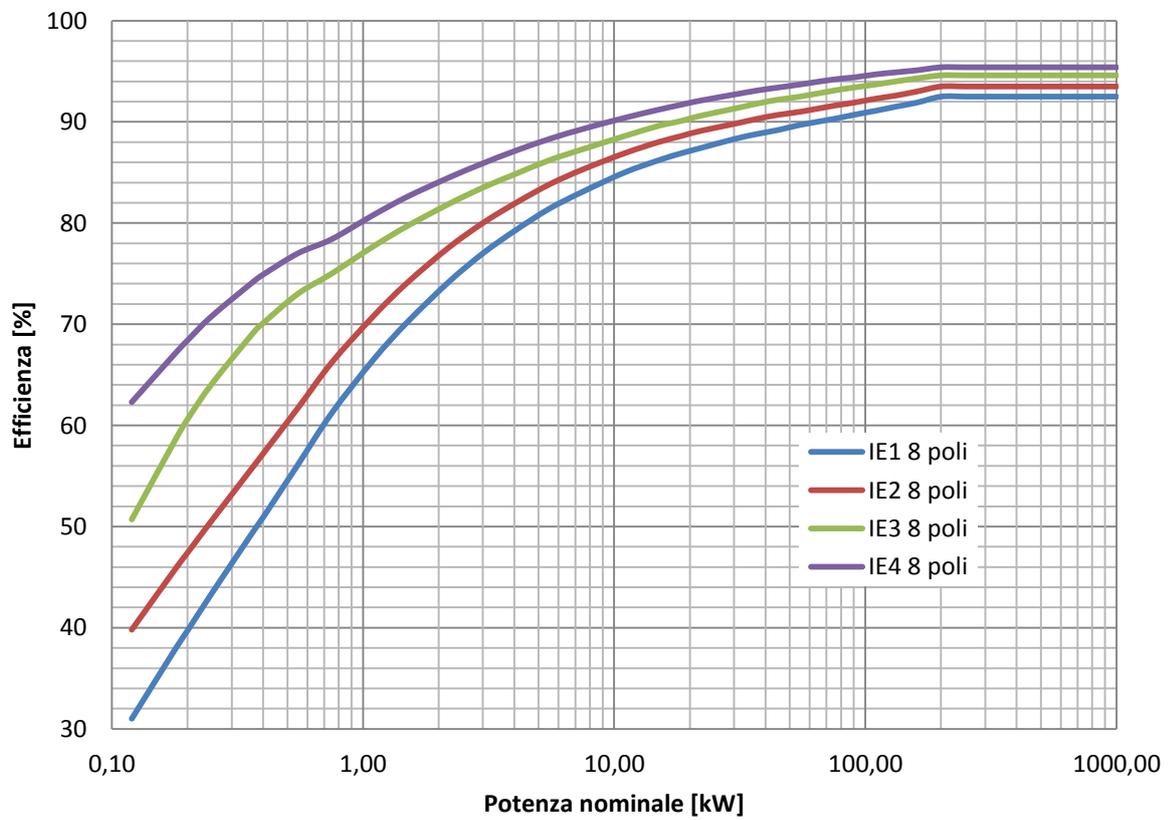


Fig. 5 – Confronto tra rendimenti IE per motori asincroni trifase a 8 poli

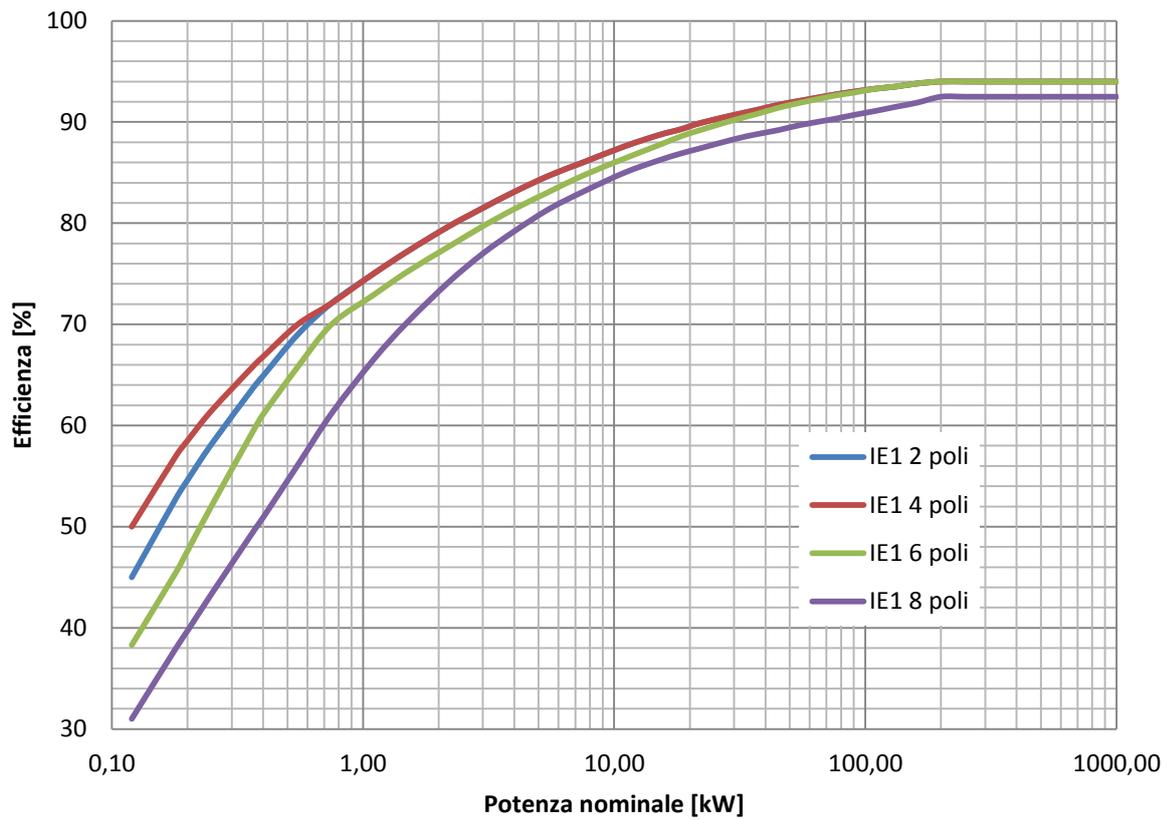


Fig. 6 – Confronto tra rendimenti IE1 per motori asincroni trifase a da 2 a 8 poli

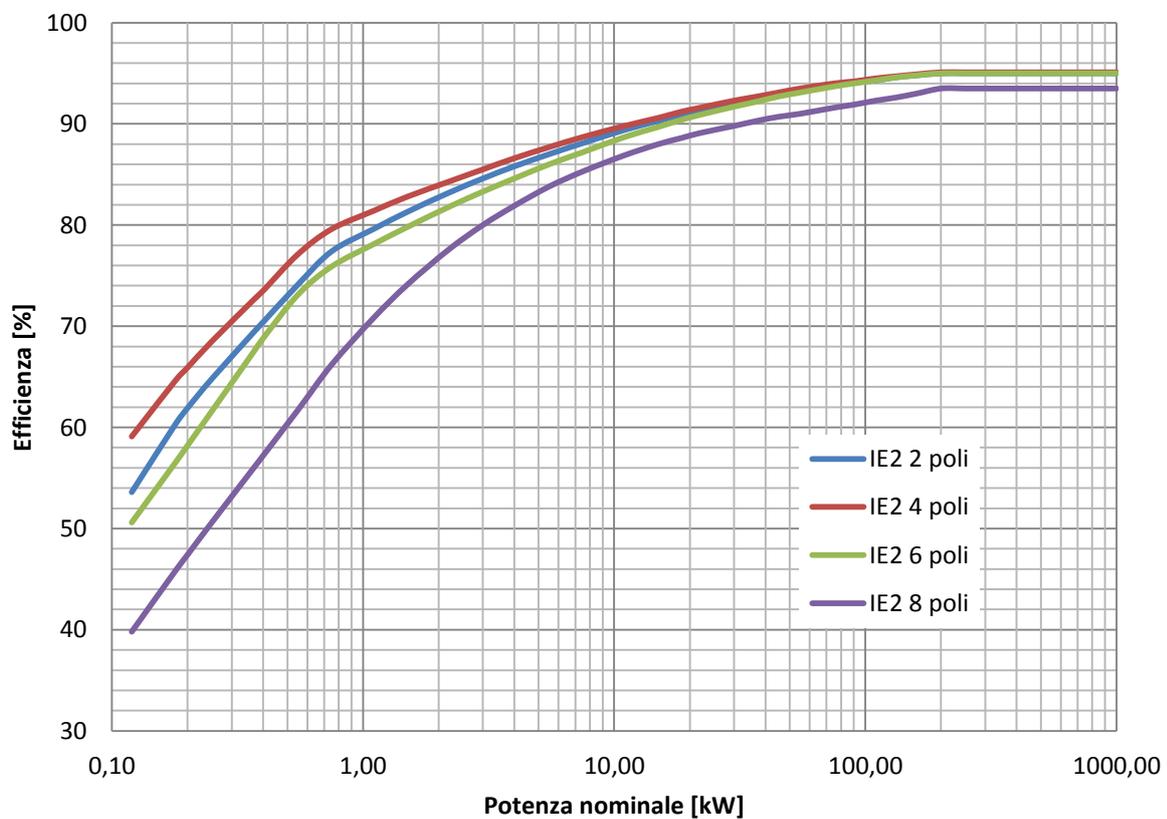


Fig. 7 – Confronto tra rendimenti IE2 per motori asincroni trifase a da 2 a 8 poli

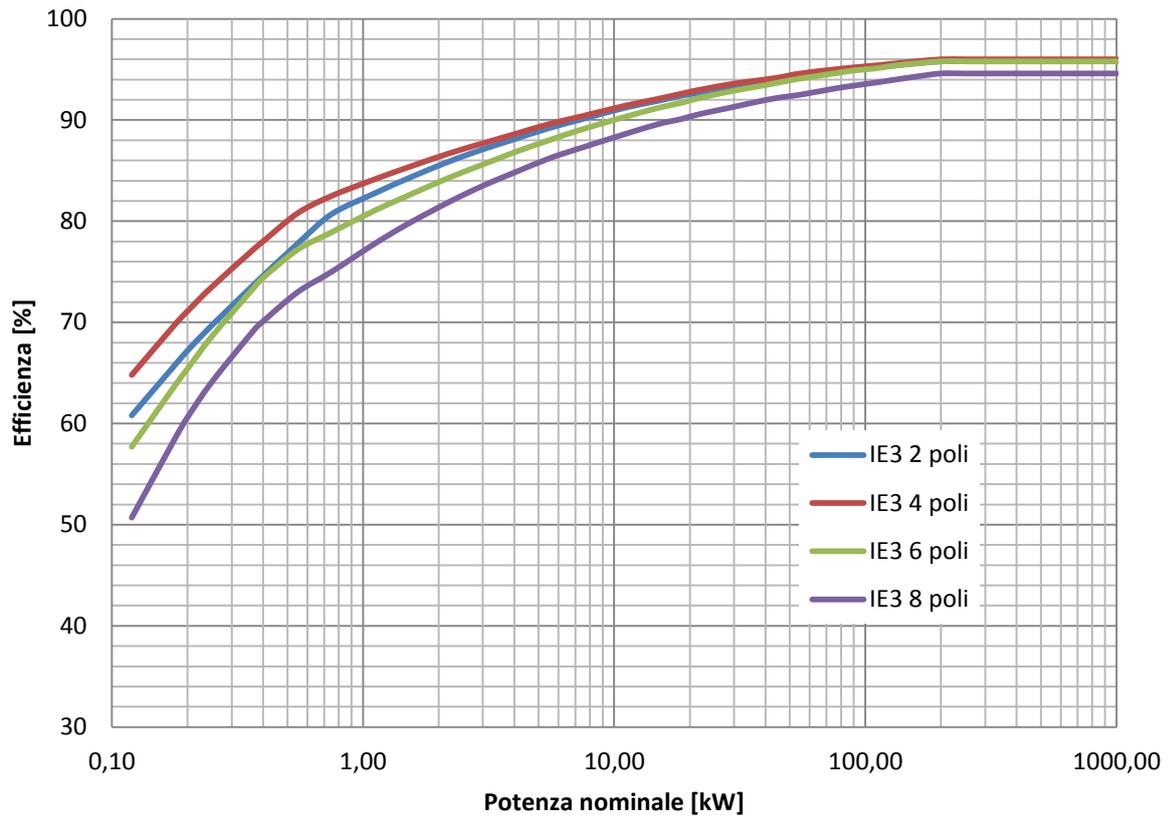


Fig. 8 – Confronto tra rendimenti IE3 per motori asincroni trifase a da 2 a 8 poli

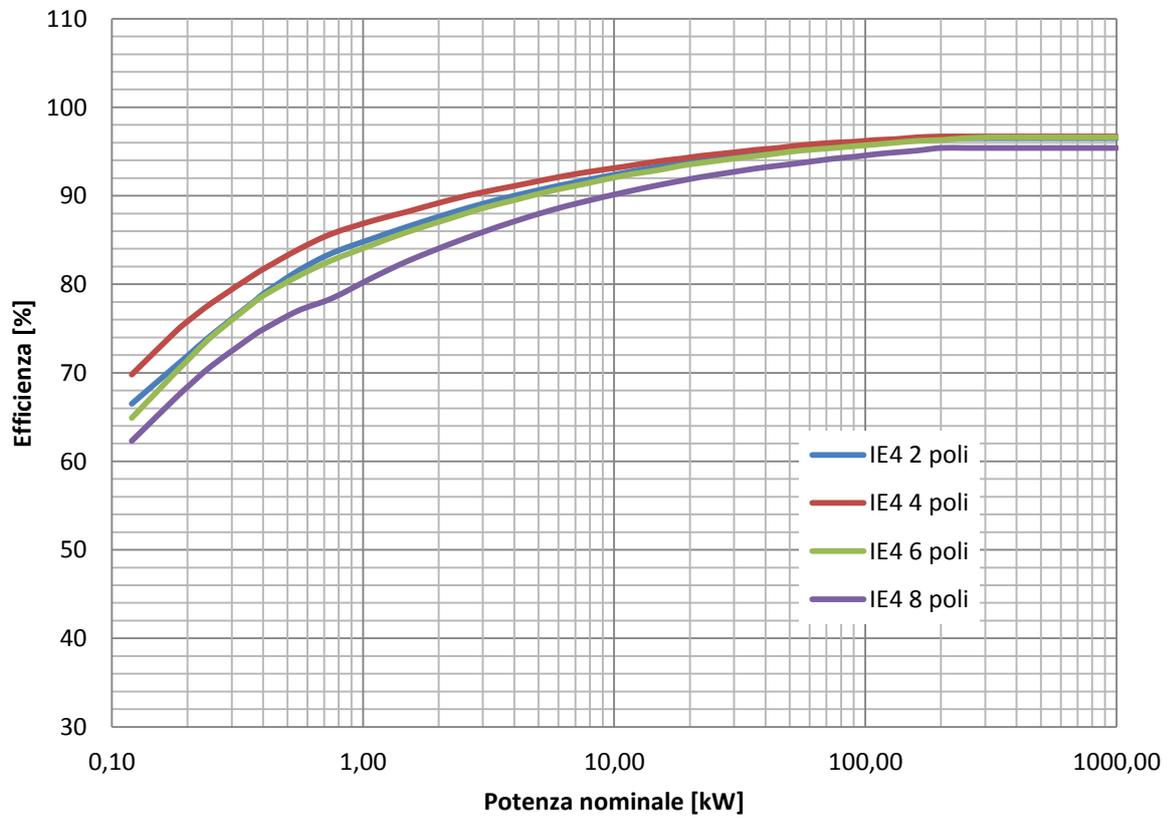


Fig. 9 – Confronto tra rendimenti IE4 per motori asincroni trifase a da 2 a 8 poli

3 Osservazioni sulla misurazione dell'efficienza mediante il metodo diretto o la stima delle perdite separate

L'efficienza di un motore elettrico è definita come il rapporto tra la potenza meccanica in uscita e la potenza elettrica attiva assorbita in ingresso. Considerati i livelli di efficienza sempre crescenti richiesti ai costruttori di motori da parte della normativa vigente, le misurazioni di efficienza devono essere condotte con metodi appropriati e precisione conforme a tali elevati valori; errori, anche di entità contenuta, possono infatti generare deviazioni e propagarsi nella procedura di misurazione, con effetti negativi sulla corretta attribuzione della classe di efficienza ai motori in prova.

Classicamente, due sono metodi adottabili per le misure di efficienza: il metodo diretto, ed il metodo indiretto. Il metodo diretto, che formalmente è analogo alla definizione classica di efficienza, si basa sulla misurazione della potenza elettrica attiva in ingresso, a partire da misurazioni di tensioni e correnti elettriche, e sulla misurazione delle grandezze meccaniche in uscita, quali velocità angolare e coppia.

Storicamente, per evitare le complesse, poco precise e costose misurazioni di coppia, la misurazione dell'efficienza dei motori elettrici è stata basata sulla misurazione della potenza elettrica attiva in ingresso, e sulla determinazione delle perdite di potenza nel motore, in base a conoscenze sulle caratteristiche delle macchine elettriche in prova.

E' possibile individuare diverse categorie di perdite di potenza durante il funzionamento di un motore elettrico; nel caso di motori asincroni con rotore a gabbia di scoiattolo si può far riferimento al seguente elenco, illustrate in Fig. 10:

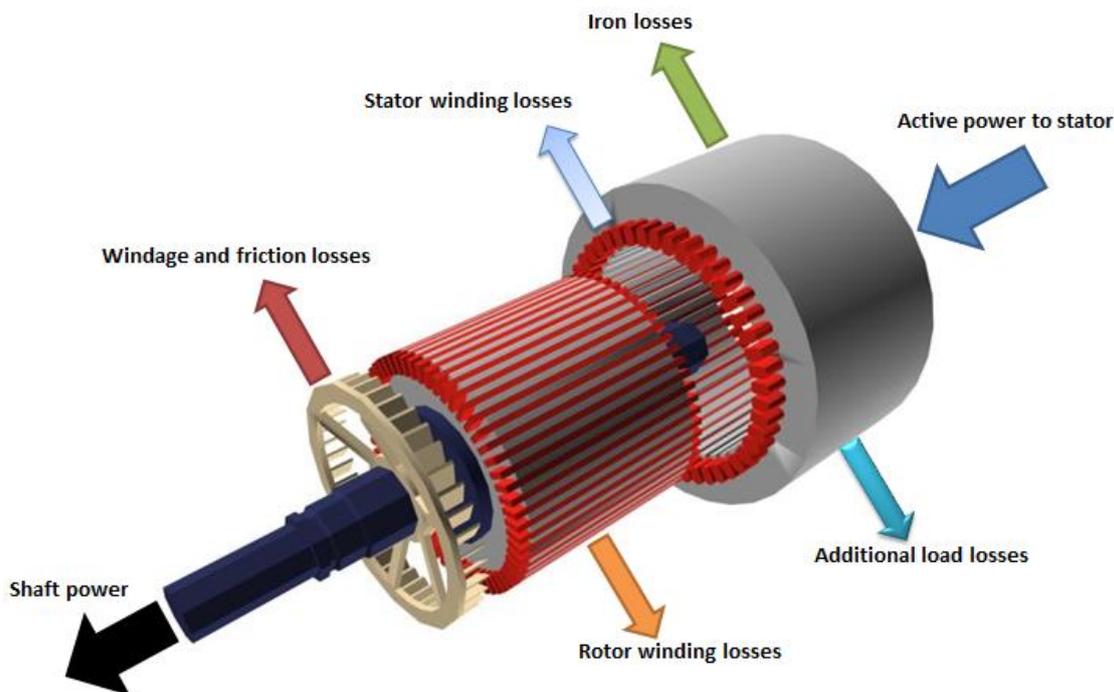


Fig. 10 – Perdite di un motore asincrono

- perdite nel ferro (iron losses)- perdite legate alla variabilità nel tempo del flusso magnetico, dovute ad isteresi e correnti parassite nel materiale costituente i nuclei magnetici, e si considerano poco legate al carico erogato dal motore;
- perdite negli avvolgimenti di statore (stator winding losses) – perdite legate ad effetto Joule negli avvolgimenti di statore, fortemente dipendenti dal carico erogato dal motore
- perdite negli avvolgimenti del rotore (rotor winding losses) - perdite legate ad effetto Joule negli avvolgimenti di rotore, fortemente dipendenti dal carico erogato dal motore ;
- perdite per ventilazione ed attrito (windage and friction losses) – perdite legate al raffreddamento del motore, ed all'attrito dei supporti, e fortemente dipendente dalla velocità angolare del motore;

- perdite addizionali (additional load losses PLL) – perdite legate alla non uniforme distribuzione delle correnti negli avvolgimenti ed alle correnti parassite nelle parti metalliche prossime agli avvolgimenti, dipendenti dal carico erogato dal motore.

In particolare, nella versione precedente della norma IEC 60034-2 [5], nella Sezione 12 “Metodi di prova”, si affermava che *“se non altrimenti specificato, il rendimento garantito di una macchina è quello che si basa sulla determinazione delle perdite separate, ma se si può scegliere il metodo, la valutazione del rendimento deve basarsi sulla precisione ottenibile con metodo, sui valori del rendimento e sul tipo di macchina considerata”*. In una nota successiva, la stessa edizione della norma affermava che: *“In alcuni paesi un rendimento del 90% è considerato come limite per l'applicazione del metodo indiretto, mentre altri paesi preferiscono un valore inferiore, per es. il 70%.”*

Coerentemente con queste osservazioni, la stessa norma nella Sezione 18 prescriveva come metodo di prova preferito per la determinazione dell'efficienza di motori asincroni polifase il metodo indiretto, basato sulla somma delle perdite valutate separatamente come perdite costanti a vuoto a tensione nominale, perdite a carico e perdite addizionali.

Come conseguenza evidente di questo approccio di tipo indiretto, la misurazione della coppia non era prescritta in questa edizione della norma, come si può dedurre facilmente leggendo la Sezione 3 nella quale le specifiche in termini di precisione sembrano essere definite solo per le misurazioni di grandezze elettriche: *“Salvo diversa prescrizione, gli strumenti di misura ed i loro accessori, come i trasformatori di misura, gli shunts ed i ponti usati durante le prove, devono avere una precisione pari ad almeno classe 0,5 o migliore (IEC 51), ad eccezione dei wattmetri trifasi e dei wattmetri per bassi fattori di potenza per i quali è ammessa una classe di precisione 1,0 o migliore.”*

A conferma di quanto affermato, si può facilmente notare che la stessa edizione della norma propone una lista di simboli nella quale la coppia non è considerata, nonostante il fatto evidente che, durante le prove a carico necessarie alla misurazione delle perdite a carico, la determinazione dei punti di funzionamento del motore in prova, in termini percentuali della potenza nominale, non possa essere condotta senza misurazioni di coppia.

Si può concludere quindi che questa edizione della norma sia stata scritta coerentemente con l'approccio classico alla determinazione dell'efficienza della machine elettriche in generale, per le quale la misurazione della coppia deve essere evitata per ottenere presumibilmente una valutazione dell'efficienza con maggiore precisione. Coerentemente con questo approccio, le perdite addizionali venivano quantificate non ricorrendo a misurazioni di carico erogato, ma a partire da un assunto conseguente osservazioni storicamente condotte sulle macchine elettriche rotanti, per le quali non è scorretto considerare le perdite addizionali nell'ordine dello 0,5% della potenza nominale della macchina, ponendole in funzione del quadrato della corrente di statore misurata durante le prove a carico.

Nella versione della IEC 60034-2-1 [5] considerata, uno sforzo per migliorare la precisione nella misurazione dell'efficienza è del tutto evidente, con l'introduzione di una prima classificazione in termini qualitativi per le differenti metodologie di prova illustrate nella stessa. Infatti, nel paragrafo 5.2 si afferma che: *“L'incertezza cui si fa riferimento nella presente Norma è l'incertezza nella determinazione del rendimento reale. Riflette le variazioni legate alla procedura di prova e all'apparecchiatura di prova utilizzate. L'incertezza dovrebbe essere espressa come valore numerico, ma una tale prescrizione necessiterebbe di prove sufficienti a determinarne valori rappresentativi e confrontabili. La presente Norma utilizza i seguenti livelli di incertezza relativa:*

- *“bassa” si applica a determinazioni del rendimento che si basano unicamente sui risultati di prova;*
- *“media” si applica a determinazioni del rendimento che si basano su approssimazioni limitate;*
- *“alta” si applica a determinazioni del rendimento che si basano su ipotesi/presunzioni.”*

Nello stesso documento, al paragrafo 5.3 si osserva che: *“E' difficile stabilire regole precise per la determinazione del rendimento. La scelta del metodo di prova da utilizzare dipende dalle informazioni*

richieste, dalla precisione richiesta, dal tipo e dalle dimensioni della macchina interessata e dall'apparecchiatura di prova disponibile (alimentazione, carico o macchina di trascinamento)."

Nonostante questa corretta osservazione, si presentano nella norma le Tabelle 1-3, dedicate ad elencare e suddividere i diversi metodi per la determinazione del rendimento rispettivamente per le macchine in corrente continua (Tabella 1), macchine ad induzione (Tabella 2) e macchine sincrone (Tabella 3), secondo il livello qualitativo di incertezza presunta dei metodi stessi.

Ne risulta che, per le macchine ad induzione di nostro interesse, il metodo diretto è proposto come preferibile solo per i motori monofase e per i motori trifase di potenza nominale minore di 1 kW, e che, coerentemente con la precedente versione della norma, il metodo preferibile per la determinazione dell'efficienza è ancora una volta il metodo indiretto basato sulla determinazione separata delle perdite per tutte le macchine asincrone trifasi la cui potenza nominale sia compresa tra 1 e 150 kW, con una innovazione inerente la determinazione delle perdite addizionali a carico.

4 Osservazioni sulle grandezze e le procedure di misurazione inerenti la determinazione sperimentale dell'efficienza dei motori asincroni.

Per la determinazione sperimentale dell'efficienza con il metodo indiretto, che richiede la valutazione separata delle perdite, è richiesta la misurazione e la determinazione delle seguenti grandezze, più volte durante le procedure che saranno illustrate di seguito:

- a) resistenza degli avvolgimenti di statore e temperatura degli stessi;
- b) temperatura dal fluido di raffreddamento del motore (aria per motori autoventilati);
- c) frequenza della tensione di rete;
- d) tensioni trifase di alimentazione;
- e) correnti trifase assorbite;
- f) potenza attiva assorbita;
- g) velocità angolare;
- h) coppia erogata.

La temperatura superficiale del motore in prova deve essere comunque monitorata, per garantire che lo stesso sia in condizioni di equilibrio termico prima dell'avvio delle misurazioni.

Tutte le quantità sopra elencate devono essere monitorate durante l'esecuzione delle prove, o all'inizio ed alla fine delle stesse, ed i loro valori di misura sono necessari per la determinazione dell'efficienza, mediante la valutazione delle perdite separate:

- 1) perdite costanti durante le prove a vuoto, che richiedono la misura della resistenza degli avvolgimenti di statore, delle tensioni di alimentazione e delle correnti assorbite trifasi, della potenza attiva assorbita, e della velocità angolare per lo meno in 7 differenti punti di funzionamento, a diverse percentuali della tensione nominale di alimentazione;
- 2) perdite per attrito e ventilazione, da valutarsi utilizzando un metodo di regressione lineare basata sull'espressione delle perdite come funzione del quadrato della tensione di alimentazione, al variare della stessa;
- 3) perdite nel ferro, per ciascun punto di funzionamento a carico (almeno 6), da valutarsi a partire dalla medesima curva determinata per la valutazione delle perdite per attrito e ventilazione, con l'introduzione di una correzione sull'effettiva tensione causa delle perdite stesse, considerando la caduta di tensione causata dalla corrente di statore;
- 4) perdite negli avvolgimenti di statore, mediante la misurazione della resistenza degli avvolgimenti e delle correnti di statore durante le prove a carico;
- 5) perdite negli avvolgimenti di rotore, mediante la misurazione della potenza attiva e dello scorrimento a partire dalla velocità angolare, e da valutarsi sottraendo dalla potenza attiva le perdite negli avvolgimenti di statore e le perdite nel ferro come definite sopra;

- 6) perdite addizionali a carico, mediante la misurazione della potenza attiva assorbita, della velocità angolare, della coppia erogata, per la determinazione della potenza meccanica in uscita, e da ottenersi sottraendo dalla potenza attiva assorbita i diversi contributi sopra elencati: la potenza meccanica in uscita, le perdite negli avvolgimenti di statore, le perdite negli avvolgimenti di rotore, le perdite per attrito e ventilazione e le perdite nel ferro.

Quest'ultimo punto è il più critico, dal punto di vista metrologico, di tutta la procedura per la determinazione dell'efficienza con metodo indiretto; è noto che mediamente le perdite addizionali a carico siano stimabili come lo 0,5% della potenza nominale del motore, con scostamenti che vedono valori maggiori per motori di piccola taglia, e valori minori per motori di taglie maggiori. La determinazione per differenza di una quantità così limitata è notoriamente una modalità ad elevata incertezza.

Per ovviare a questo inconveniente, e garantire significatività ai risultati ottenuti, la norma IEC 60034-2-1 [5] richiede che venga valutato il coefficiente di correlazione esistente tra le perdite così ottenute ed il valore al quadrato delle coppia misurata, per i diversi punti di funzionamento durante le prove a carico. Se il coefficiente ottenuto non dovesse essere soddisfacente, tutte le prove devono essere eseguite nuovamente, e le cause della scarsa accuratezza di esecuzione delle stesse deve essere investigata e corretta.

Dal punto di vista metrologico, non appare ottimale l'introduzione di un unico momento di valutazione dell'accuratezza delle prove, ed, inoltre, collocato proprio al termine di tutta la procedura di misurazione; sarebbe più logico richiedere l'effettuazione di controlli della qualità delle misurazioni in altra modalità, definendo dei valori d'incertezza massimi per ciascuna tipologia di perdita, in modo da non dover rilevare solo alla fine di tutto il processo la non utilità dei dati misurati ed elaborati fino a quel momento.

Per la determinazione dell'efficienza con il metodo diretto, è necessario misurare e monitorare le seguenti grandezze, durante le prove a carico, in almeno 6 punti di funzionamento:

- a) frequenza della tensione di rete;
- b) tensioni trifase di alimentazione;
- c) correnti trifase assorbite;
- d) potenza attiva assorbita;
- e) velocità angolare;
- f) coppia erogata.

La temperatura superficiale del motore in prova deve essere comunque monitorata, per garantire che lo stesso sia in condizioni di equilibrio termico prima dell'avvio delle misurazioni.

Le uniche grandezze che devono essere impiegate per la determinazione dell'efficienza sono la potenza attiva in ingresso, la velocità angolare e la coppia erogate durante le prove.

Non vi sono procedure complesse né per l'esecuzione delle prove, né per l'elaborazione dei risultati.

Poiché l'obiettivo dell'attività di ricerca illustrata nel presente documento è la valutazione dell'incertezza di misura nella determinazione dell'efficienza dei motori asincroni, in accordo con [5], dalle osservazioni sopra riportate risulta interessante confrontare le incertezze che i due metodi a confronto possono offrire, introducendo le metodologie di analisi quantitative dell'incertezza richieste dalla Guida GUM [3], per valutare se davvero il metodo indiretto sia sempre preferibile.

Dal punto di vista metrologico, la norma IEC 60034-2-1 [5] dovrebbe essere rivista, con l'introduzione di indicazioni per determinare l'incertezza durante le procedure descritte, e specificando limiti quantitativi per la stessa, superando le indicazioni del tutto qualitative che sono riportate nelle Sezioni 5.2 and 5.3.

Solo mediante uno sforzo nella direzione della definizione di limiti quantitativi per le incertezze dei diversi metodi di misura proposti, è possibile redigere una classificazione che possa soddisfare requisiti di ripetitività e riproducibilità delle misurazioni di efficienza.

5 Sintesi della “Guida all’espressione dell’incertezza” BIPM JCGM 100:2008 (GUM)

Se consideriamo quanto prescritto nella [3], l’incertezza nelle misurazioni è generalmente costituita da diverse componenti, raggruppabili in due categorie in funzione del modo in cui i loro valori sono determinati:

- A per quelle incertezze ottenute applicando metodi statistici ad una serie di dati sperimentali ; L’incertezza di tipo A fa riferimento ad \bar{x} come stima del valore sperato del misurando e $\sigma(x)$ come stima della dev. std. della media.
- B per quelle incertezze non ottenute mediante osservazioni ripetute, ma che vengono descritte, valutate e limitate con altri metodi, quali ad esempio:
 - l’esperienza dell’operatore,
 - i risultati di esperimenti collaterali,
 - gli effetti noti delle grandezze di influenza,
 - una scelta di strumenti di caratteristiche superiori,
 - l’adozione di opportune condizioni ambientali,

Le incertezze di tipo B non possono essere ridotte con metodi statistici.

5.1 Incertezze di categoria A

Le incertezze di categoria A sono dovute alla presenza di processi di rumore casuale. Di esse è possibile dare una descrizione statistica e quindi individuare un processo di stima per ridurre, o eliminarne, l’influenza. Si considerino n osservazioni indipendenti x_i della grandezza x ottenute nelle stesse condizioni sperimentali.

Introdotta una opportuna distribuzione di probabilità, solitamente ma non necessariamente gaussiana (è sufficiente sia simmetrica), si calcola il valore medio \bar{x} ed è immediato ricavare la varianza sperimentale e lo scarto quadratico medio, chiamato *scarto tipo* u . La stima del valore sperato è la *media aritmetica* delle osservazioni x .

5.2 Incertezze di categoria B

Per quanto concerne le incertezze di categoria B, queste vengono valutate non con l’analisi statistica, ma in qualsiasi altro modo. La stima delle incertezze di tipo B è effettuata a priori, ed è basata su informazioni non provenienti dall’esperimento in oggetto, ma precedenti ad esso.

Tali informazioni possono provenire da:

- misurazioni effettuate da se o da altri durante prove precedenti ed indipendenti,...;
- certificati di taratura, relazioni di prova, registri di laboratorio,...;
- documentazione tecnica di strumentazione o impianti...;
- manuali d’uso, relazioni di collaudo, ... ;
- letteratura tecnica: libri, manuali, elenchi di costanti, ... ;
- esperienza del personale del laboratorio.

Come già detto, l’incertezza di tipo sistematico è prodotto dall’interazione di molteplici sorgenti di scarti di tipo sistematico. Se questi sono quantità note, la misura può essere corretta; se i vari scarti non sono noti (perché dovuti a molteplici fattori non quantificabili) la misura non può essere corretta.

In questo caso si deve ipotizzare un’opportuna distribuzione di probabilità, per ognuna delle singole fonti di incertezza, per poter trattare assieme le incertezze dovute a cause diverse.

Il passo successivo è quello di combinare in una sola cifra tutte le stime delle incertezze di categoria B.

5.3 Considerazioni sull'incertezza composta

Come illustrato in [3], qualora le grandezze di cui sia necessario determinare il valore sperimentale non siano ottenibili mediante una misurazione diretta, e sia comunque possibile esprimere una relazione analitica che leghi la grandezza da determinare, o misurando y , ad un numero N di altre grandezze indipendenti e direttamente misurabili x_i , il misurando può essere determinato mediante la detta relazione $y = f(x_1, \dots, x_N)$. In questo caso, risulta necessario determinare l'incertezza tipo composta di y , impiegando la seguente espressione in [3]:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 \cdot u^2(x_i)} \quad (1)$$

Dove le $u(x_i)$ sono le incertezze che si ottengono nella misurazione delle grandezze x_i .

Nel caso di grandezze direttamente misurabili non indipendenti, come si è visto per la determinazione delle perdite nel ferro e delle perdite addizionali a carico in [5], l'espressione dell'incertezza composta deve tener conto di altri contributi, e si modifica nel modo seguente:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right) \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial x_j}\right) \cdot u(x_i, x_j)} =$$

$$\sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 \cdot u^2(x_i) + 2 \cdot \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right) \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial x_j}\right) \cdot u(x_i, x_j)} \quad (2)$$

Il parametro $u(x_i, x_j)$ rappresenta la covarianza delle grandezze x_i e x_j , $Cov(x_i, x_j)$; se $x_i = x_j$ allora la covarianza coincide con la varianza.

La covarianza rappresenta il grado di dipendenza statistica tra la stima di due grandezze, ed è nulla se queste non siano effettivamente dipendenti tra loro.

La covarianza è stimata a partire dai dati ottenuti con N misurazioni x_i e x_j , e dati i valori medi di x_i e x_j pari a $X_i = E(x_i)$ e $X_j = E(x_j)$, si può esprimerla come:

$$Cov(x_i, x_j) = E\{[x_i - E(x_i)] \cdot [x_j - E(x_j)]\} = E(x_i \cdot x_j) - E(x_i) \cdot E(x_j) \quad (3)$$

$$Cov(x_i, x_j) = \frac{1}{N} \sum_{i=j=1}^N (x_i - X_i)(x_j - X_j) \quad (4)$$

La covarianza $Cov(x_i, x_j)$ è positiva se x_i e x_j variano rispetto alla media nello stesso modo (se x_i supera la media, anche x_j si comporta parimenti), ed è negativa se varia in modo opposto, e zero se le oscillazioni di x_i e x_j hanno oscillazioni indipendenti rispetto alle rispettive medie.

Quindi è necessario determinare la covarianza in caso di grandezze correlate.

Come indicato da [5], il coefficiente di correlazione $r(x_i, x_j)$ può essere introdotto con la relazione seguente:

$$r(x_i, x_j) = \frac{u(x_i, x_j)}{u(x_i) \cdot u(x_j)} \quad (5)$$

Sostituendo la (5) in (2), l'espressione finale che si ottiene è la seguente:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right) \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial x_j}\right) \cdot u(x_i, x_j) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 \cdot u^2(x_i) + 2 \cdot \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right) \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial x_j}\right) \cdot u(x_i) \cdot u(x_j) \cdot r(x_i, x_j)} \quad (6)$$

A tale relazione per l'espressione dell'incertezza composta si deve far ricorso nella misurazione delle grandezze quali perdite nel ferro ed addizionali.

Si può già evincere la complessità delle procedure per la determinazione dell'incertezza di misura dell'efficienza con il metodo indiretto, che è conseguente a queste osservazioni.

6 Specifiche di precisione per la strumentazione di misura da adottare

La norma [5] definisce i livelli di precisione per la strumentazione che deve essere adottata durante le misurazioni, dai cui risultati dipende la valutazione dell'efficienza.

Gli strumenti di misura devono essere di classe almeno pari a 0.2, in accordo con [29], mentre per prove di routine è accettabile una classe di precisione inferiore, pari a 0.5, secondo quanto descritto nella Sezione 9.1 della norma [29].

I trasformatori di misura devono essere di precisione come richiesto da [29], cosicché gli errori di misura commessi non superino $\pm 0.5\%$ per le misurazioni generali, ed il $\pm 0.3\%$ per le prove sulle macchine ad induzione di nostro interesse.

Gli apparati per le misurazioni di coppia devono avere una precisione di $\pm 0.2\%$ del fondo scala.

Il test di verifica per un'eventuale correzione della coppia misurata è richiesto quando la coppia sia misurata con un dinamometro, che può introdurre un offset. Questa procedura è richiesta anche qualora tra dispositivo di misura della coppia ed albero motore sia inserito un giunto meccanico.

I dispositivi per la misurazione della frequenza devono avere precisione pari a 0.1% del fondo scala.

La velocità angolare deve essere misurata con una precisione di $\pm 0.1\%$ o 1 rpm, scegliendo tra i due requisiti quello minore.

La misurazione delle temperature degli avvolgimenti deve essere effettuata con una precisione di $\pm 1^\circ\text{C}$.

Tutti questi valori sono riassunti in Tabella 1.

Tabella 1 – Requisiti di incertezza per la strumentazione di misura

Tipologia di strumenti	Precisione (CEI EN 60034-2-1)
Trasformatori di misura	+/- 0.3 %
Wattmetri	+/- 0.2 % del fondo scala
Voltmetri	+/- 0.2 % del fondo scala
Amperometri	+/- 0.2 % del fondo scala
Trasduttori di coppia	+/- 0.2 % del fondo scala
Tachimetri	$\pm 0.1\%$ oppure +/- 1 rpm (valore minore)
Frequenzimetri	+/- 0.1 % del fondo scala
Ohmmetri	+/- 0.2 % del fondo scala
Termometri	+/- 1 °C

A partire da queste specifiche per le varie tipologie di strumentazione, per la determinazione delle componenti di incertezza di categoria B, è necessario introdurre una opportuna distribuzione di probabilità; è possibile ricorrere a densità di probabilità uniformi, triangolare, ad “U” o gaussiane. Per le applicazioni di nostro interesse, si adotta la densità di probabilità uniforme, rettangolare, illustrata in Fig. 11, per ogni sorgente di incertezza considerata, poiché è ragionevole supporre che il valore vero della grandezza misurata sia all’interno di una banda di ampiezza $2a$ senza però la possibilità di supporre che vi sia all’interno di questa una zona a probabilità maggiore o minore.

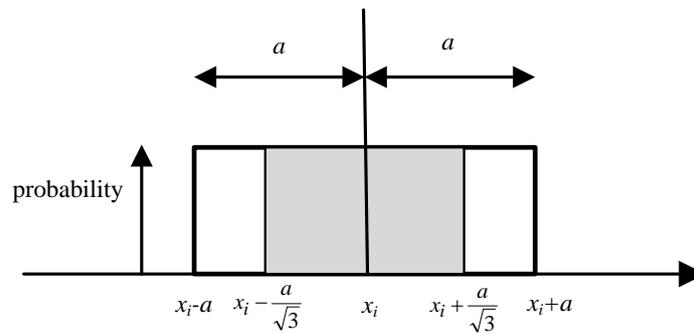


Fig. 11. Il valore atteso x_i al centro di una distribuzione uniforme.

Per questo tipo di densità di probabilità, si considera come incertezza tipo l’espressione seguente, in cui a rappresenta la semi ampiezza dell’intervallo considerato:

$$u = \frac{a}{\sqrt{3}} \tag{7}$$

7 Determinazione delle incertezze delle grandezze di misura coinvolte nella determinazione dell’efficienza

Nel seguito vengono discusse e presentate le espressioni per ottenere i contributi di incertezza relativi alle grandezze elaborate seguendo le indicazioni in [5], con il metodo delle perdite separate.

7.1 L’incertezza nella misurazione delle temperature e della resistenza degli avvolgimenti.

La resistenza degli avvolgimenti deve essere misurata e riportata ad una temperatura di riferimento. Per macchine asincrone trifase, si effettua la misurazione della resistenza tra due morsetti statorici $R = R_{ij}$; per motori con rotore avvolto si misura anche la resistenza degli avvolgimenti di statore $R_{r,II}$.

Il valore assunto dalle resistenze al termine di ogni prova deve essere determinato come richiesto dalla norma by IEC 60034-1 [28], paragrafo 8.6.2.3.3, mediante adozione di un metodo di estrapolazione. La misurazione deve essere condotta nel minor tempo possibile, e, poiché la fermata di un motore in prova può richiedere tempi molto rapidi, è necessario predisporre accuratamente la modalità di esecuzione della misurazione.

Qualora la resistenza (sotto carico) degli avvolgimenti non possa essere misurata direttamente, si può intervenire valutando la resistenza mediante determinazione della variazione di temperatura degli avvolgimenti, in accordo con il paragrafo 5.7.2 di [5], come il metodo definito nel paragrafo 5.7.1 della stessa norma, o la determinazione della temperatura mediante dispositivi come ETD o termocoppie, o la determinazione della temperatura ricorrendo ad una macchina di identiche caratteristiche.

La temperatura raggiunta durante le prove da un avvolgimento può essere ottenuta con l'espressione seguente:

$$\theta_w = \frac{R_w}{R_0} (235 + \theta_0) - 235 \quad (8)$$

dove θ_0 è il valore iniziale di temperatura, misurato a macchina fredda ed in equilibrio termico con l'ambiente prima dell'esecuzione di ogni altra prova, con valore di incertezza pari ad $u(\theta_0)$; R_0 è la resistenza dell'avvolgimento misurata alla temperatura θ_0 , con incertezza pari a $u(R_0)$ ed R_w è il valore della resistenza degli avvolgimenti al termine di ogni prova, la cui incertezza è pari a $u(R_w)$.

L'incertezza $u_c(\theta_w)$ nella misurazione della temperatura degli avvolgimenti si può esprimere a partire dalle seguenti relazioni:

$$\frac{\partial \theta_w}{\partial R_w} = \frac{\theta_0 + 235}{R_0} \quad (9)$$

$$\frac{\partial \theta_w}{\partial R_0} = -\frac{R_w \cdot (\theta_0 + 235)}{R_0^2} \quad (10)$$

$$\frac{\partial \theta_w}{\partial \theta_0} = \frac{R_w}{R_0} \quad (11)$$

$$u_c(\theta_w) = \sqrt{\left(\frac{\theta_0 + 235}{R_0}\right)^2 \cdot u^2(R_w) + \left(-\frac{R_w \cdot (\theta_0 + 235)}{R_0^2}\right)^2 \cdot u^2(R_0) + \left(\frac{R_w}{R_0}\right)^2 \cdot u^2(\theta_0)} \quad (12)$$

7.2 L'incertezza nella misurazione del fattore di correzione della temperatura.

I valori di misura delle resistenze degli avvolgimenti devono essere riportati ad una temperatura convenzionale di 25 °C del fluido di raffreddamento, secondo quanto prescritto in [5].

Il fattore di correzione della temperatura k_θ , impiegato per correggere sia i valori di resistenza che di scorrimento, è da determinarsi con la seguente relazione:

$$k_\theta = \frac{235 + \theta_w + 25 - \theta_c}{235 + \theta_w} \quad (13)$$

dove θ_c è la temperatura del fluido di raffreddamento in ingresso al motore durante la prova, misurata con incertezza $u(\theta_c)$, θ_w è la temperatura degli avvolgimenti misurata come sopra in accordo con [5] al paragrafo 5.7.2, con incertezza $u_c(\theta_w)$.

La costante termica del materiale di cui sono costituiti gli avvolgimenti è assumibile pari a 235 per il rame, e 225 per l'alluminio.

Quando il fluido refrigerante primario o secondario sia l'acqua, la temperatura di riferimento è 25°C, come specificato in Tabella 4 della norma [28].

L'incertezza di misura di k_θ può essere espressa mediante le seguenti relazioni:

$$\frac{\partial k_\theta}{\partial \theta_w} = \frac{1}{235 + \theta_w} - \frac{235 + \theta_w + 25 - \theta_c}{(235 + \theta_w)^2} \quad (14)$$

$$\frac{\partial k_{\theta}}{\partial \theta_c} = -\frac{1}{235+\theta_w} \quad (15)$$

$$u_c(k_{\theta}) = \sqrt{\left(\frac{1}{235+\theta_w} - \frac{235+\theta_w+25-\theta_c}{(235+\theta_w)^2}\right)^2 \cdot u_c^2(\theta_w) + \left(-\frac{1}{235+\theta_w}\right)^2 \cdot u^2(\theta_c)} \quad (16)$$

7.3 L'incertezza nella misurazione delle perdite costanti durante le prove a vuoto

Se si analizza il paragrafo 9.1.1.3 della norma [5], le prove a vuoto sono descritte con modalità simili a quanto riportato nella versione precedente della norma. 4 o più punti di misura sono da individuarsi nell'intervallo di tensione compreso tra il 60% ed il 120% della tensione nominale di alimentazione, ad intervalli regolari; 3 o più punti sono da individuarsi nell'intervallo tra 20% e 50% della stessa.

Da queste prove a vuoto si possono determinare sia le perdite nel ferro P_{fe} che le perdite per attrito e ventilazione P_{fw} la cui somma costituisce l'ammontare delle perdite costanti P_k , cioè indipendenti dal carico meccanico erogato dal motore in prova

$$P_k = P_{fe} + P_{fw} = P_0 - P_s = P_0 - 1.5 \cdot I_0^2 \cdot R_{110} = P_0 - 3 \cdot I_0^2 \cdot R_0 \quad (17)$$

dove $R = R_{110}$ è la resistenza di fase storica, misurata al termine delle prove a vuoto, in accordo con quanto descritto al paragrafo 3.6.3 di [5]; la sottrazione delle perdite nel rame di statore durante le prove a vuoto sono necessarie in quanto la corrente a vuoto di un motore asincrono può raggiungere valori pari al 40% della corrente nominale, per cui questo contributo non può essere trascurato.

Dati quindi i valori di incertezza di misura di P_0 , I_0 e R_0 pari rispettivamente a $u(P_0)$, $u(I_0)$ e $u(R_0)$, l'incertezza nella misurazione delle perdite a costanti P_k può essere espressa mediante le seguenti relazioni, in accordo con (1):

$$\frac{\partial P_k}{\partial P_0} = 1 \quad (18)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial I_0} = -6R_0 \cdot I_0 \quad (19)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial R_0} = -3 \cdot I_0^2 \quad (20)$$

$$u_c(P_k) = \sqrt{u^2(P_0) + (-6R_0 \cdot I_0)^2 \cdot u^2(I_0) + (-3 \cdot I_0^2)^2 \cdot u^2(R_0)} \quad (21)$$

7.4 L'incertezza nella misurazione delle perdite per attrito e ventilazione

Per effettuare la separazione delle perdite nelle prove a vuoto, in accordo con [5], le perdite per attrito e ventilazione si ottengono con un metodo grafico, di regressione a zero. In particolare, tra i valori di perdite misurate a vuoto, tutti i valori che non si considerino affetti da fenomeni di saturazione magnetica possono essere utilizzati per l'individuazione di una curva di perdite costanti P_k in funzione della tensione a vuoto al quadrato U_0^2 .

Mediante estrapolazione di una retta al valore nullo di tensione, l'intercetta con l'asse a tensione nulla identifica le perdite per attrito e ventilazione P_{fw} .

Per determinare l'incertezza di misura di P_{fw} , si può utilizzare la seguente espressione, definendo le perdite costanti in funzione di U_0^2 :

$$P_k = C \cdot U_0^2 + P_{fw} \quad (22)$$

Il parametro C può essere determinato per analogia con il coefficiente A , introdotto nel paragrafo 8.2.2.5.1.2 della norma [5], mediante una regressione lineare basata sull'espressione delle perdite in funzione del quadrato dei valori di coppia misurati. Questo approccio verrà illustrato nei paragrafi seguenti del presente documento.

Quindi, C può essere espresso come:

$$C = \frac{N \cdot \sum_{i=1}^N (P_{ki} \cdot U_{0i}^2) - \sum_{i=1}^N P_{ki} \cdot \sum_{i=1}^N U_{0i}^2}{N \cdot \sum_{i=1}^N U_{0i}^4 - (\sum_{i=1}^N U_{0i}^2)^2} \quad (23)$$

E quindi le perdite P_{fw} si possono esprimere come:

$$P_{fw} = \frac{\sum_{i=1}^N P_{ki}}{N} - C \cdot \frac{\sum_{i=1}^N U_{0i}^2}{N} = \frac{\sum_{i=1}^N P_{ki}}{N} - \left(\frac{N \cdot \sum_{i=1}^N (P_{ki} \cdot U_{0i}^2) - \sum_{i=1}^N P_{ki} \cdot \sum_{i=1}^N U_{0i}^2}{N \cdot \sum_{i=1}^N U_{0i}^4 - (\sum_{i=1}^N U_{0i}^2)^2} \right) \cdot \left(\frac{\sum_{i=1}^N U_{0i}^2}{N} \right) \quad (24)$$

Se sono noti i valori delle incertezze nell'insieme dei dati di misura di U_{0i} e P_{ki} , pari a $u(U_{0i})$ e $u(P_{ki})$ rispettivamente, l'incertezza di P_{fw} si può esprimere in accordo con le relazioni (2) e (3), poiché le grandezze considerate sono tra loro correlate:

$$\frac{\partial P_{fw}}{\partial P_{ki}} = \frac{1}{N} + \frac{(\sum_{i=1}^N U_{0i}^2 - N \cdot U_{0i}^2) \cdot \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_{0i}^2 \right)}{N \cdot \sum_{i=1}^N U_{0i}^4 - (\sum_{i=1}^N U_{0i}^2)^2} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_{fw}}{\partial U_{0i}} = & \frac{(2 \cdot U_{0i} \cdot \sum_{i=1}^N P_{ki} - 2N \cdot U_{0i} \cdot P_{ki}) \cdot \frac{\sum_{i=1}^N U_{0i}^2}{N} - 2 \cdot U_{0i} \cdot (N \cdot \sum_{i=1}^N P_{ki} \cdot U_{0i}^2 - \sum_{i=1}^N P_{ki} \cdot \sum_{i=1}^N U_{0i}^2)}{N \cdot \sum_{i=1}^N U_{0i}^4 - (\sum_{i=1}^N U_{0i}^2)^2} + \\ & \frac{(4 \cdot N \cdot U_{0i}^3 - 4 \cdot U_{0i} \cdot \sum_{i=1}^N U_{0i}^2) \cdot \frac{\sum_{i=1}^N U_{0i}^2}{N} - (N \cdot \sum_{i=1}^N P_{ki} \cdot U_{0i}^2 - \sum_{i=1}^N P_{ki} \cdot \sum_{i=1}^N U_{0i}^2)}{(N \cdot \sum_{i=1}^N U_{0i}^4 - (\sum_{i=1}^N U_{0i}^2)^2)^2} \end{aligned} \quad (26)$$

quindi, in accordo con (2) e (3), l'incertezza $u_c(P_{fw})$ di P_{fw} è pari a:

$$u_c(P_{fw}) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial P_{fw}}{\partial P_{ki}} \right)^2 \cdot u^2(P_{ki}) + \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial P_{fw}}{\partial U_{0i}} \right)^2 \cdot u^2(U_{0i}) + 2 \cdot \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \left(\frac{\partial P_{fw}}{\partial P_{ki}} \right) \cdot \left(\frac{\partial P_{fw}}{\partial U_{0j}} \right) \cdot u(P_{ki}) \cdot u(U_{0j}) \cdot r(P_{ki}, U_{0j})} \quad (26)$$

Dove $r(P_{ki}, U_{0j})$ è il coefficiente di correlazione di U_{0i} e P_{ki} variabile nell'intervallo $+/-1$:

$$r(P_{ki}, U_{0j}) = \frac{u(P_{ki}, U_{0j})}{u(P_{ki}) \cdot u(U_{0j})} \quad (27)$$

con $u(P_{ki}, U_{0j})$ pari alla covarianza di U_{0i} e P_{ki} .

Analogamente, l'incertezza del parametro C è esprimibile come:

$$\frac{\partial C}{\partial P_{ki}} = \frac{N \cdot U_{0i}^2 - \sum_{i=1}^N U_{0i}^2}{N \cdot \sum_{i=1}^N U_{0i}^4 - (\sum_{i=1}^N U_{0i}^2)^2} \quad (28)$$

$$\frac{\partial C}{\partial U_{0i}} = \frac{2N \cdot P_{ki} \cdot U_{0i} - 2 \cdot U_{0i} \cdot \sum_{i=1}^N P_{ki}}{N \cdot \sum_{i=1}^N U_{0i}^4 - (\sum_{i=1}^N U_{0i}^2)^2} - \frac{(4N \cdot U_{0i}^3 - 4 \cdot U_{0i} \cdot \sum_{i=1}^N U_{0i}^2) \cdot (N \cdot \sum_{i=1}^N P_{ki} \cdot U_{0i}^2 - \sum_{i=1}^N P_{ki} \cdot \sum_{i=1}^N U_{0i}^2)}{[N \cdot \sum_{i=1}^N U_{0i}^4 - (\sum_{i=1}^N U_{0i}^2)^2]^2} \quad (29)$$

E l'incertezza $u_c(C)$ di C è pari a:

$$u_c(C) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial C}{\partial P_{ki}}\right)^2 \cdot u^2(P_{ki}) + \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial C}{\partial U_{0i}}\right)^2 \cdot u^2(U_{0i}) + 2 \cdot \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \left(\frac{\partial C}{\partial P_{ki}}\right) \cdot \left(\frac{\partial C}{\partial U_{0j}}\right) \cdot u(P_{ki}) \cdot u(U_{0j}) \cdot r(P_{ki}, U_{0j})} \quad (30)$$

7.5 L'incertezza nella misurazione delle perdite nel ferro

Per quanto concerne le perdite P_{fe} nel ferro attivo e le perdite nel addizionali a vuoto negli altri materiali del motore, l'effetto della caduta di tensione dovuta alla resistenza degli avvolgimenti di statore deve essere tenuta in conto, come descritto nel paragrafo 8.2.2.4.4 di [5].

In dettaglio, si considerano le tensioni misurate nell'intervallo compreso tra il 60% ed il 120% della tensione nominale di alimentazione del motore, per definire la curva curve $P_{fe} = P_k - P_{fw}$ in funzione della tensione U_0 . Il valore delle perdite nel punto di lavoro considerato possono essere ottenute dalla curva sopra citata, considerando il valore di tensione corretto U_r , con il quale è possibile tener conto delle cadute di tensione resistive dovute alle correnti a vuoto I nello statore;

Date la fase φ della corrente a vuoto I :

$$\cos\varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I} \quad (31)$$

$$\sin\varphi = \sqrt{1 - \left(\frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I}\right)^2} \quad (32)$$

Dalle quali di ottiene il valore della tensione U_r :

$$U_r = \sqrt{\left(U - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I \cdot R \cdot \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I}\right)^2 + \left[\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I \cdot R \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I}\right)^2}\right]^2} \quad (33)$$

Dove P_1 , I , R ed U sono definite come specificato nel paragrafo 6.4.4.2 di [5], in cui sono descritte le modalità di prova a carico del motore.

Dati i valori di incertezza nelle misurazioni di P_1 pari a $u(P_1)$, I pari a $u(I)$, R pari a $u(R)$ e U pari a $u(U)$, l'incertezza $u_c(U)$ nella misurazione di U_r può essere ottenuta per mezzo delle seguenti relazioni:

$$\frac{\partial U_r}{\partial U} = \frac{2 \cdot \left(U - \frac{R \cdot P_1}{2 \cdot U}\right) \cdot \left(\frac{R \cdot P_1}{2 \cdot U^2} + 1\right) + \frac{R^2 \cdot P_1^2}{2 \cdot U^2}}{2 \cdot \sqrt{\left(U - \frac{R \cdot P_1}{2 \cdot U}\right)^2 - \frac{3 \cdot R^2 \cdot I^2 \cdot \left(\frac{P_1^2}{3 \cdot I^2 \cdot U^2} - 1\right)}{4}}} \quad (34)$$

$$\frac{\partial U_r}{\partial I} = - \frac{3 \cdot I \cdot R^2 \cdot \left(\frac{P_1^2}{3 \cdot I^2 \cdot U^2} - 1\right) - \frac{R^2 \cdot P_1^2}{2 \cdot U^2 \cdot I}}{2 \cdot \sqrt{\left(U - \frac{R \cdot P_1}{2 \cdot U}\right)^2 - \frac{3 \cdot R^2 \cdot I^2 \cdot \left(\frac{P_1^2}{3 \cdot I^2 \cdot U^2} - 1\right)}{4}}} \quad (35)$$

$$\frac{\partial U_r}{\partial R} = - \frac{\frac{3 \cdot I \cdot R^2 \cdot \left(\frac{P_1^2}{3 \cdot I \cdot U} - 1\right)}{2} + \frac{P_1 \cdot \left(U - \frac{R \cdot P_1}{2 \cdot U}\right)}{U}}{2 \cdot \sqrt{\left(U - \frac{R \cdot P_1}{2 \cdot U}\right)^2 - \frac{3 \cdot R^2 \cdot I^2 \cdot \left(\frac{P_1^2}{3 \cdot I^2 \cdot U^2} - 1\right)}{4}}} \quad (36)$$

$$\frac{\partial U_r}{\partial P_1} = - \frac{\frac{R \cdot \left(U - \frac{R \cdot P_1}{2 \cdot U}\right)}{U} + \frac{R^2 \cdot P_1}{2 \cdot U^2}}{2 \cdot \sqrt{\left(U - \frac{R \cdot P_1}{2 \cdot U}\right)^2 - \frac{3 \cdot R^2 \cdot I^2 \cdot \left(\frac{P_1^2}{3 \cdot I^2 \cdot U^2} - 1\right)}{4}}} \quad (37)$$

$$u_c(U_r) = \sqrt{\left(\frac{\partial U_r}{\partial U}\right)^2 \cdot u^2(U) + \left(\frac{\partial U_r}{\partial I}\right)^2 \cdot u^2(I) + \left(\frac{\partial U_r}{\partial R}\right)^2 \cdot u^2(R) + \left(\frac{\partial U_r}{\partial P_1}\right)^2 \cdot u^2(P_1)} \quad (38)$$

A partire dalla (22) le perdite nel ferro possono essere espresse come:

$$P_{fe} = C \cdot U_r^2 \quad (39)$$

La cui incertezza:

$$u_c(P_{fe}) = \sqrt{U_r^2 \cdot u_c^2(C) + (2 \cdot C \cdot U_r)^2 \cdot u^2(U_r)} \quad (40)$$

in cui $u_c(C)$ è nella relazione (30).

7.6 L'incertezza nella misurazione delle perdite negli avvolgimenti di statore

In accordo con quanto riportato nel paragrafo 8.2.2.4.1.2. di [5], le perdite negli avvolgimenti di statore in ogni punto di funzionamento a carico sono le seguenti, se non si applica nessuna correzione rispetto alla temperatura di prova:

$$P_s = 1.5 \cdot I^2 \cdot R \quad (41)$$

dove I e R sono definiti nel paragrafo 6.4.4.1 di [5].

Le variazioni del carico meccanico erogato devono essere nell'intervallo dal 25% al 150% della potenza nominale del motore in prova, con almeno 6 punti di funzionamento. Quattro punti devono essere distribuiti in modo uniforme tra il 25% ed il 100% della potenza nominale; i rimanenti punti sono da distribuire in modo pressoché uniforme tra il 100% ed il 150% della potenza nominale.

Le prove devono partire dal valore di carico maggiore, procedendo per valori decrescenti fino al minimo, con l'accortezza di svolgere le prove in modo da evitare un sensibile raffreddamento della macchina.

Qualora le prove si svolgessero con temperatura del fluido di raffreddamento diverso dal valore normativo di 25 °C, è necessario introdurre una correzione, mediante il fattore di temperatura già sopra introdotto, per il valore della resistenza R_N :

$$P_{s,\theta} = 1.5 \cdot I^2 \cdot R_N \cdot k_\theta \quad (42)$$

con k_θ in accordo con [5], al paragrafo 5.7.3.

Considerati i valori delle incertezze con cui sono note le grandezze I pari a $u(I)$, R_N pari a $u(R_N)$ e k_θ pari a $u_c(k_\theta)$ in (16), in accordo con l'espressione (1) l'incertezza $u_c(P_{s,\theta})$ nella misurazione di $P_{s,\theta}$ si può esprimere come:

$$u_c(P_{s,\theta}) = \sqrt{(3 \cdot I \cdot R_N \cdot k_\theta)^2 \cdot u^2(I) + (1.5 \cdot I^2 \cdot k_\theta)^2 \cdot u^2(R_N) + (1.5 \cdot I^2 \cdot R_N)^2 \cdot u^2(k_\theta)} \quad (43)$$

7.7 L'incertezza nella misurazione delle perdite negli avvolgimenti di rotore.

Secondo quanto riportato nel paragrafo 8.2.2.4.1.3 di [5], le perdite negli avvolgimenti di rotore P_r si possono valutare con l'espressione seguente, nel caso in cui il motore sia con rotore a gabbia di scoiattolo, o, in generale, non vi sia la possibilità di misurare le resistenze degli avvolgimenti rotorici:

$$P_r = (P_1 - P_s - P_{fe}) \cdot s \quad (44)$$

$$s = 1 - \frac{p \cdot n}{f} \quad (45)$$

Dove p è il numero di coppie polari del motore, P_1 è definita nel paragrafo 6.4.4.1 di [5], P_s , n e f sono indicati nel paragrafo 6.4.4.1 e P_{fe} è secondo il paragrafo 8.2.2.3.3 of [5]. La (44) non contiene correzioni in temperatura, che debbono essere introdotte se le prove sono effettuate a temperatura del fluido di raffreddamento diversa da 25°C.

Se la velocità angolare è misurata in rotazioni al minuto, la (45) diviene:

$$s = 1 - \frac{p \cdot n}{60 \cdot f} \quad (46)$$

La correzione delle perdite negli avvolgimenti di rotore, in ogni punto di funzionamento durante le prove a carico, si ottengono correggendo il valore dello scorrimento, facendo riferimento al fattore di temperatura k_θ già descritto.

$$P_{r,\theta} = (P_1 - P_{s,\theta} - P_{fe}) \cdot s_\theta \quad (47)$$

Dove in [5], il contributo $P_{s,\theta}$ è definito secondo il paragrafo 8.2.2.4.1.2, P_{fe} nel paragrafo 8.2.2.3.3, ed $s_\theta = sk_\theta$ rappresenta lo scorrimento corretto alla temperatura di riferimento del fluido refrigerante pari a 25°C in accordo con il paragrafo 5.7.3. di [5]:

$$s_\theta = \left(1 - \frac{p \cdot n}{60 \cdot f}\right) \cdot k_\theta \quad (48)$$

Dati i valori delle incertezze di n pari a $u(n)$, di f pari a $u(f)$ e di k_θ pari a $u_c(k_\theta)$, l'incertezza $u_c(s_\theta)$ nella misurazione dello scorrimento s_θ è espressa da:

$$u_c(s_\theta) = \sqrt{\left(-\frac{p \cdot k_\theta}{60 \cdot f f}\right)^2 u^2(n) + \left(\frac{p \cdot n \cdot k_\theta}{60 \cdot f^2}\right)^2 u^2(f) + \left(1 - \frac{p \cdot n}{60 \cdot f}\right)^2 u^2(k_\theta)} \quad (49)$$

L'incertezza nella misurazione di $P_{r,\theta}$ si può esprimere a partire dall'incertezza con cui sono noti P_1 , pari a $u(P_1)$, $P_{s,\theta}$ pari a $u_c(P_{s,\theta})$, P_{fe} pari a $u_c(P_{fe})$ e s_θ pari a $u_c(s_\theta)$:

$$u_c(P_{r,\theta}) = \sqrt{(s_\theta)^2 \cdot (u^2(P_1) + u_c^2(P_{s,\theta}) + u_c^2(P_{fe})) + (P_1 - P_{s,\theta} - P_{fe})^2 \cdot u_c^2(s_\theta)} \quad (50)$$

7.8 L'incertezza nella misurazione delle perdite addizionali a carico.

Nella versione precedente della norma [5], le perdite addizionali a carico si consideravano come un valore convenzionalmente assegnato, pari allo 0,5% della potenza nominale del motore, e moltiplicate per il rapporto tra il quadrato della corrente misurata durante la prova e la corrente nominale del motore, per ogni punto di lavoro nella prova a carico variabile. Questo approccio, nella versione considerata è proposto come a media od elevata incertezza, nella Tabella 2 della [5].

Il nuovo approccio alla misurazione a bassa incertezza delle perdite addizionali a carico richiede la diretta misurazione della potenza meccanica erogata, mediante la definizione di una procedura che si basa sul calcolo della differenza tra la potenza elettrica attiva assorbita dal motore e tutte le tipologie di perdite separate che finora sono state valutate nel presente documento.

Da un punto di vista metrologico, questo approccio non dovrebbe essere raccomandabile, in quanto quando un valore da misurare è così percentualmente ridotto (0,5%), le misure per differenza possono essere affette da elevata incertezza.

In accordo con il il paragrafo 8.2.2.5.1.1 di [5], le perdite addizionali a carico P_{Lr} devono essere valutate per ciascun punto di lavoro durante le prove a carico, mediante sottrazione dal valore della potenza attiva in ingresso dei seguenti contributi:

- a) potenza meccanica in uscita
- b) perdite negli avvolgimenti di statore valutate con il valore effettivo della resistenza degli avvolgimenti durante le prove;
- c) perdite nel ferro;
- d) perdite per attrito e ventilazione;
- e) perdite negli avvolgimenti di rotore, valutate con il valore effettivo dello scorrimento.

$$P_{Lr} = P_1 - P_2 - P_{s,\theta} - P_{r,\theta} - P_{fw} - P_{fe} \quad (51)$$

Dove, in [5], $P_2 = 2\pi nT$, P_1 è la potenza attiva in ingresso, T ed n sono la coppia e la velocità rotazionale nelle prove a carico, secondo quando riportato in nel paragrafo 6.4.4.2; P_s sono le perdite di statore, secondo il paragrafo 8.2.2.4.1.2; P_{fe} sono le perdite nel ferro secondo il paragrafo 8.2.2.3.3; P_{fw} sono le perdite per attrito e ventilazione, definite nel paragrafo 8.2.2.3.2 e P_r sono le perdite negli avvolgimento di rotore, come definite nel paragrafo 8.2.2.4.1.3.

L'incertezza nella misurazione della potenza meccanica erogata P_2 è:

$$u_c(P_2) = \sqrt{(2\pi n)^2 \cdot u^2(T) + (2\pi T)^2 \cdot u^2(n)} \quad (52)$$

dove $u(T)$ ed $u(n)$ sono le incertezze nelle misurazioni della coppia e della velocità rotazionale.

Per ogni valore così ottenuto delle perdite addizionali P_{Lr} , l'incertezza è:

$$u_c(P_{Lr}) = \sqrt{u^2(P_1) + u^2(P_2) + u^2(P_{s,\theta}) + u^2(P_{r,\theta}) + u^2(P_{fw}) + u^2(P_{fe})} \quad (53)$$

Considerate le perdite addizionali a carico in (51) e valutate in ogni punto di carico, la norma [5] al paragrafo 8.2.2.5.1.2 di [5] definisce che mediante una regressione lineare, nella quale le perdite siano espresse in funzione del quadrato della coppia erogata, si valuti la presenza di un termine costante da sottrarre alle perdite:

$$P_{Lr} = A \cdot T^2 + B \quad (54)$$

dove T è definito nel paragrafo 8.2.2.5.1.1 di [5], mentre A e B sono ottenuti in accordo con quanto prescritto nei paragrafi 6.4.4.2 e 8.2.2.5.1.1, considerando al meno 6 punti di carico, e mediante la seguente relazioni:

$$A = \frac{N \cdot \sum_{i=1}^N (P_{Lri} \cdot T_i^2) - \sum_{i=1}^N P_{Lri} \cdot \sum_{i=1}^N T_i^2}{N \cdot \sum_{i=1}^N T_i^4 - (\sum_{i=1}^N T_i^2)^2} \quad (55)$$

$$B = \frac{\sum_{i=1}^N P_{Lri}}{N} - A \cdot \frac{\sum_{i=1}^N T_i^2}{N} \quad (56)$$

Le relazioni 54 e 55 hanno significato solo se P_{Lri} e T_i sono correlate tra loro; pertanto, la verifica di questa condizione richiede la determinazione del fattore di correlazione γ :

$$\gamma = \frac{N \cdot \sum_{i=1}^N (P_{Lri} \cdot T_i^2) - \sum_{i=1}^N P_{Lri} \cdot \sum_{i=1}^N T_i^2}{\sqrt{[N \cdot \sum_{i=1}^N (T_i^2)^2 - (\sum_{i=1}^N T_i^2)^2] \cdot [N \cdot \sum_{i=1}^N P_{Lri}^2 - (\sum_{i=1}^N P_{Lri})^2]}} \quad (57)$$

Se γ è minore di 0,95 l'operatore è autorizzato a rimuovere dall'elenco delle misurazioni adottare quella che risulta la peggiore, come scostamento dalle altre, e può ripetere le procedure di calcolo.

Se, dopo questa correzione, γ cresce e diviene ≥ 0.95 , questa seconda regressione è adottabile per determinare A e B . Se γ rimane al di sotto di 0,95, le misurazioni ottenute complessivamente non si considerano soddisfacenti. Le cause alla base di questa situazione di scarsa qualità delle misurazioni devono essere investigate e tutte le prove devono essere ripetute, come specificato nel paragrafo 6.4.4.2 si [5].

Dati i valori di A , se $\gamma \geq 0.95$, le perdite addizionali P_{LL} in funzione della coppia T in ogni punto di carico sono:

$$P_{LL}(T) = A \cdot T^2 \quad (58)$$

con A e T in accordo con il paragrafo 8.2.2.5.1.2. di [5].

La valutazione del fattore A non è priva di incertezza, in accordo con la (2); si può ottenere tale incertezza tenendo in conto le osservazioni on [5] riguardanti la propagazione dell'incertezza per grandezze correlate, come P_{Lri} e T_i sembrano essere in accordo con [8].

A partire dalle incertezze definite in (6) e (54), dato A a partire dalla (55), le derivate parziali per P_{Lri} e T_i sono:

$$\frac{\partial A}{\partial P_{Lri}} = \frac{N \cdot T_i^2 - \sum_{i=1}^N T_i^2}{N \cdot \sum_{i=1}^N T_i^4 - (\sum_{i=1}^N T_i^2)^2} \quad (59)$$

$$\frac{\partial A}{\partial T_i} = \frac{2N \cdot P_{Lri} \cdot T_{Lri} - 2 \cdot T_{Lri} \cdot \sum_{i=1}^N P_{Lri}}{N \cdot \sum_{i=1}^N T_i^4 - (\sum_{i=1}^N T_i^2)^2} - \frac{(4N \cdot T_i^3 - 4 \cdot T_i \cdot \sum_{i=1}^N T_i^2) \cdot (N \cdot \sum_{i=1}^N P_{Lri} \cdot T_i^2 - \sum_{i=1}^N P_{Lri} \cdot \sum_{i=1}^N T_i^2)}{[N \cdot \sum_{i=1}^N T_i^4 - (\sum_{i=1}^N T_i^2)^2]^2} \quad (60)$$

L'incertezza di A è quindi:

$$u_c(A) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial A}{\partial P_{Lri}}\right)^2 \cdot u^2(P_{Lri}) + \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial A}{\partial T_i}\right)^2 \cdot u^2(T_i) + 2 \cdot \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \left(\frac{\partial A}{\partial P_{Lri}}\right) \cdot \left(\frac{\partial A}{\partial T_j}\right) \cdot u(P_{Lri}) \cdot u(T_j) \cdot r(P_{Lri}, T_j)} \quad (61)$$

Dove il fattore di correlazione $r(P_{Lri}, T_i)$ per P_{Lri} e T_i è:

$$r(P_{Lri}, T_j) = \frac{u(P_{Lri}, T_j)}{u(P_{Lri}) \cdot u(T_j)} \quad (62)$$

ed $u(P_{Lri}, T_j)$ è la covarianza di P_{Lr} e T .

L'incertezza nella misurazione delle perdite addizionali P_{LL} secondo la (58) è:

$$u_c(P_{LL}) = \sqrt{T^4 \cdot u_c^2(A) + (2 \cdot A \cdot T)^2 \cdot u^2(T)} \quad (63)$$

7.9 L'incertezza nella determinazione dell'efficienza con il metodo indiretto

L'incertezza nella determinazione indiretta dell'efficienza η , come descritta [5], richiede la valutazione dell'ammontare delle perdite per ogni punto di funzionamento, ed è espressa da:

$$\eta = 1 - \frac{P_{s,\theta} + P_{r,\theta} + P_{fw} + P_{fe} + P_{LL}}{P_1} \quad (64)$$

L'incertezza di η , secondo la (2), si può ottenere con il medesimo approccio sopra illustrato per le precedenti grandezze, quindi:

$$\frac{\partial \eta}{\partial P_1} = \frac{P_{s,\theta} + P_{r,\theta} + P_{fw} + P_{fe} + P_{LL}}{P_1^2} \quad (65)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial P_{s,\theta}} = \frac{\partial \eta}{\partial P_{r,\theta}} = \frac{\partial \eta}{\partial P_{fw}} = \frac{\partial \eta}{\partial P_{fe}} = \frac{\partial \eta}{\partial P_{LL}} = -\frac{1}{P_1} \quad (66)$$

E l'incertezza $u_c(\eta)$ è:

$$u_c(\eta) = \sqrt{\left(\frac{\partial \eta}{\partial P_1}\right)^2 \cdot u(P_1)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial P_{s,\theta}}\right)^2 \cdot u(P_{s,\theta})^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial P_{r,\theta}}\right)^2 \cdot u(P_{r,\theta})^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial P_{fw}}\right)^2 \cdot u(P_{fw})^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial P_{fe}}\right)^2 \cdot u(P_{fe})^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial P_{LL}}\right)^2 \cdot u(P_{LL})^2} \quad (67)$$

Da cui:

$$u_c(\eta) = \sqrt{\left(\frac{P_{s,\theta} + P_{r,\theta} + P_{fw} + P_{fe} + P_{LL}}{P_1^2}\right)^2 \cdot u(P_1)^2 + \left(-\frac{1}{P_1}\right)^2 \cdot (u(P_{s,\theta})^2 + u(P_{r,\theta})^2 + u(P_{fw})^2 + u(P_{fe})^2 + u(P_{LL})^2)} \quad (68)$$

7.10 L'incertezza nella determinazione dell'efficienza con il metodo diretto

A differenza di quanto sopra riportato per il metodo indiretto, per la determinazione dell'incertezza dell'efficienza con il metodo diretto sono necessarie solo due grandezze, quali la potenza meccanica erogata, P_2 , pari al prodotto della velocità rotazionale n e della coppia T , e della potenza attiva assorbita P_1 . Non vi sono correlazioni tra le misurazione delle grandezze considerate, per cui si può scrivere:

$$\eta_d = \frac{P_2}{P_1} \quad (69)$$

La cui incertezza è

$$u_c(\eta_d) = \sqrt{\left(\frac{1}{P_1}\right)^2 \cdot u(P_2)^2 + \left(-\frac{P_2}{P_1^2}\right)^2 \cdot u(P_1)^2} \quad (70)$$

dove l'incertezza di P_2 è espressa in (52).

8 Confronto tra le incertezze di categoria B ottenibili sperimentalmente con approccio indiretto e diretto nella determinazione dell'efficienza dei motori asincroni: caso studio.

Per determinare tutti i contributi necessari alla determinazione sperimentale dell'incertezza nella misurazione dell'efficienza di un motore asincrono, è necessario misurare ed elaborare tutte le grandezze sopra elencate e descritte, seguendo le procedure e le prescrizioni definite in [4].

Considerando l'approccio alla trattazione dei contributi di categoria B in [5], le precisioni nella Tabella del presente documento descrivono un intervallo di ampiezza $2a$, nell'intorno della grandezza considerata X , sotto le ipotesi che si tratti di una distribuzione rettangolare, e l'incertezza tipo sia definibile come indicato dall'equazione (7).

Allo scopo di poter quantificare e confrontare le incertezze di categoria B, sono state determinate sperimentalmente le efficienze indiretta e diretta di un motore asincrono trifase a 2 poli, con rotore a gabbia, potenza nominale 3.00 kW, alimentazione 380-420 Vrms, connessione delle fasi a stella, corrente nominale 6.10 Arms, frequenza nominale 50 Hz, velocità nominale 2920 rpm, fattore di potenza nominale 0.86, autoventilato.

Si osserva che i risultati che verranno presentati nel seguito, in relazione al confronto tra le incertezze ottenute con il metodo indiretto e diretto sono del tutto generali, ed estendibili a motori di taglia anche superiore; ciò poiché si tratta di confronti tra elaborazioni di dati sperimentali ottenuti con la medesima strumentazione in entrambi i metodi proposti, e che la strumentazione sia elettrica che meccanica oggi disponibile sul mercato consente di ottenere le stesse incertezze fino a potenze dell'ordine del MW.

Nelle pagine seguenti sono riportate le grandezze misurate, con la corrispondente portata della strumentazione di misura impiegata e l'incertezza tipo associata, definite come già enunciato.

Sono stati impiegati i seguenti strumenti di misura:

- per la misurazione della temperatura dell'aria di raffreddamento del motore, è stato utilizzato un Fluke 971 971 Temperature Humidity Meter;
- per la misurazione della temperatura della carcassa del motore, è stato utilizzato un Fluke 61 IR thermometer;
- per la misurazione della resistenza degli avvolgimenti di statore è stato impiegato un multimetro digitale ad elevate prestazioni Keithley Model 2001 High Performance Digital Multimeter;
- le misurazioni di coppia e di velocità di rotazione a carico sono state effettuate con il trasduttore Magtrol vibro-meter TM 108;

- il carico meccanico è stato realizzato con il banco dinamometrico ad isteresi Magtrol HD 815, raffreddato ad aria, equipaggiato con l'unità di controllo Magtrol DSP 6001;
- la velocità di rotazione durante le prove a vuoto è stata misurata con un tachimetro ottico PROVA Digital Photo Tachometer RM-1000;
- le tensioni variabili richieste durante le prove sono state ottenute mediante un regolatore di tensione ad induzione trifase, modello ISGEV RT 250 MB 4, tensione regolabile tra 30 e 770 Vrms, corrente erogabile tra 0 e 100 Arms.
- le misurazioni di tensione, corrente e potenza attiva sono state effettuate con il wattmetro Yokogawa WT1800; le determinazioni delle incertezze di misura di tali grandezze sono state determinate mediante un foglio di calcolo in formato Excel distribuito direttamente da Yokogawa [30].

Il diagramma a blocchi in Fig. 12 riporta il sistema di misura adottato.

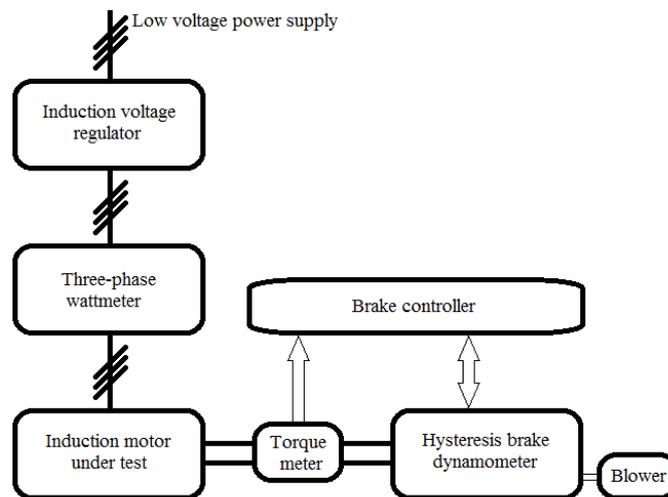


Fig.12 – Diagramma a blocchi del sistema di misura

Nelle tabelle seguenti, da Tabella 2 a Tabella 10, sono riportate le grandezze misurate durante le prove, in termini di valore centrale, portata della strumentazione di misura ed incertezza tipo. L'andamento delle stesse grandezze è illustrato dalle Figure 13 – 19.

Tabella 2 – Valori centrali ed incertezze tipo per le misurazioni di temperatura e di resistenza

Grandezza misurata	Valore centrale	Portata	Incertezza tipo
Resistenza media degli avvolgimenti di statore, alla temperatura ambiente * [Ω]	1.2387	2	0.0023
Resistenza media degli avvolgimenti di statore, al termine della prova a vuoto [Ω]	1.2940	2	0.0023
Resistenza media degli avvolgimenti di statore, al termine della prova a carico [Ω]	1.4421	2	0.0023
*Temperatura ambiente, [$^{\circ}\text{C}$]	19.0	-	0.3
Temperatura dell'aria di raffreddamento, durante la prova a vuoto [$^{\circ}\text{C}$]	20.0	-	0.3
Temperatura dell'aria di raffreddamento, durante la prova carico [$^{\circ}\text{C}$]	32.0	-	0.3

Tabella 3 – Valori centrali ed incertezze tipo per le misurazioni di tensione efficace media delle tre fasi durante la prova a vuoto

Grandezza misurata		Valore centrale	Portata	Incertezza tipo
Tensione efficace media [V] nella prova a vuoto	$(V/V_n)^2 = 0.053$	53.02	60	0.02
	$(V/V_n)^2 = 0.095$	70.91	100	0.04
	$(V/V_n)^2 = 0.202$	103.30	150	0.05
	$(V/V_n)^2 = 0.306$	127.29		0.06
	$(V/V_n)^2 = 0.399$	145.30	300	0.06
	$(V/V_n)^2 = 0.506$	163.59		0.09
	$(V/V_n)^2 = 0.601$	178.39		0.10
	$(V/V_n)^2 = 0.699$	192.42		0.10
	$(V/V_n)^2 = 0.797$	205.30		0.11
	$(V/V_n)^2 = 0.902$	218.51		0.11
	$(V/V_n)^2 = 1.014$	231.60		0.11
	$(V/V_n)^2 = 1.109$	242.19		0.11
	$(V/V_n)^2 = 1.189$	250.81		0.12
	$(V/V_n)^2 = 1.293$	261.60		0.12
	$(V/V_n)^2 = 1.440$	276.09	0.12	
$(V/V_n)^2 = 1.575$	288.63	0.13		

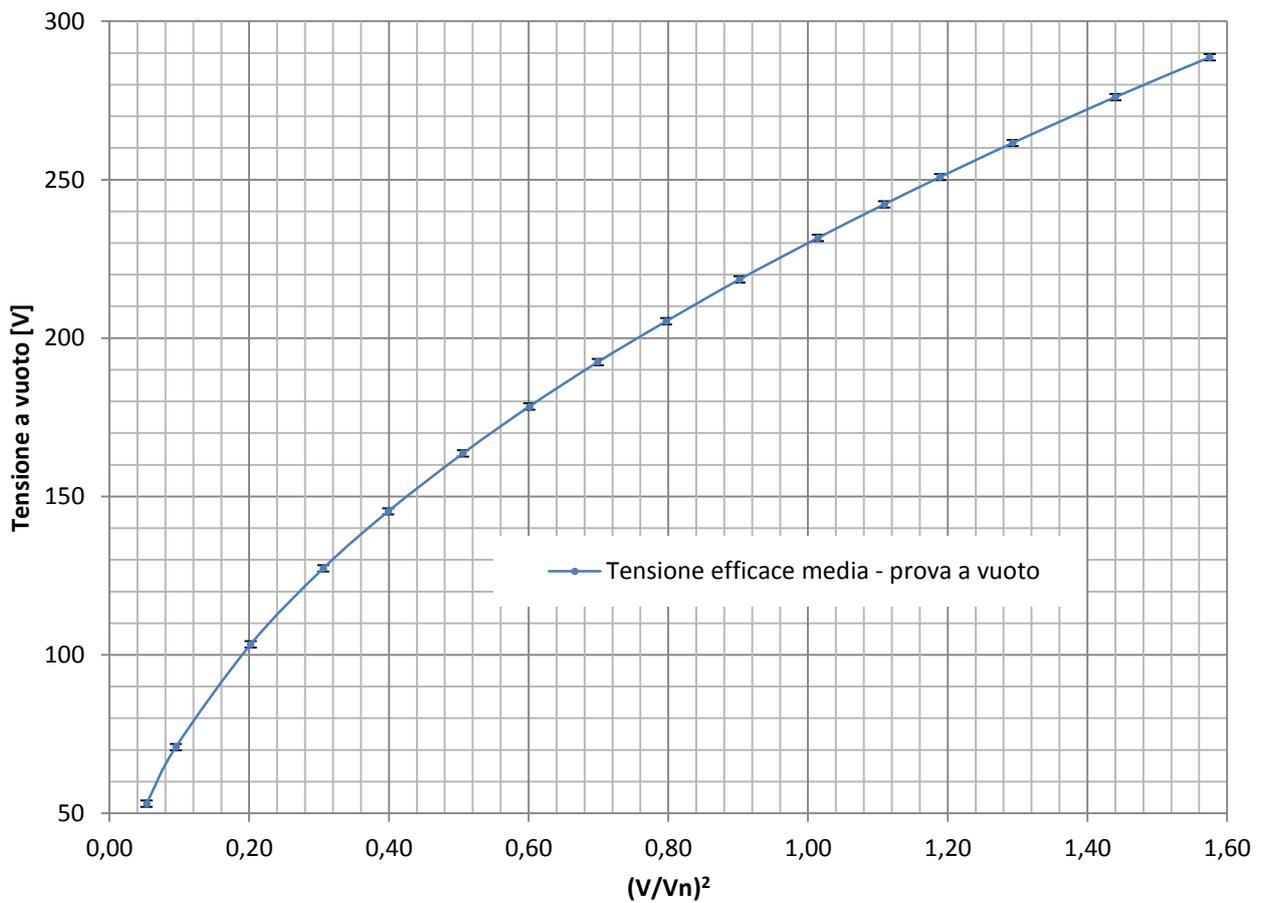


Fig. 13 – Tensione efficace media delle tre fasi durante la prova a vuoto, con incertezza tipo.

Tabella 4 – Valori centrali ed incertezze tipo per le misurazioni di corrente efficace media delle tre fasi durante la prova a vuoto

Grandezza misurata	Valore centrale	Portata	Incertezza tipo
Corrente efficace media [A] nella prova a vuoto	$(V/V_n)^2 = 0.053$	1	0.0003
	$(V/V_n)^2 = 0.095$		0.0003
	$(V/V_n)^2 = 0.202$		0.0004
	$(V/V_n)^2 = 0.306$	2	0.0006
	$(V/V_n)^2 = 0.399$		0.0007
	$(V/V_n)^2 = 0.506$		0.0007
	$(V/V_n)^2 = 0.601$		0.0008
	$(V/V_n)^2 = 0.699$	5	0.0009
	$(V/V_n)^2 = 0.797$		0.0014
	$(V/V_n)^2 = 0.902$		0.0014
	$(V/V_n)^2 = 1.014$		0.0016
	$(V/V_n)^2 = 1.109$		0.0017
	$(V/V_n)^2 = 1.189$		0.0018
	$(V/V_n)^2 = 1.293$	10	0.0020
	$(V/V_n)^2 = 1.440$		0.0031
$(V/V_n)^2 = 1.575$	0.0036		

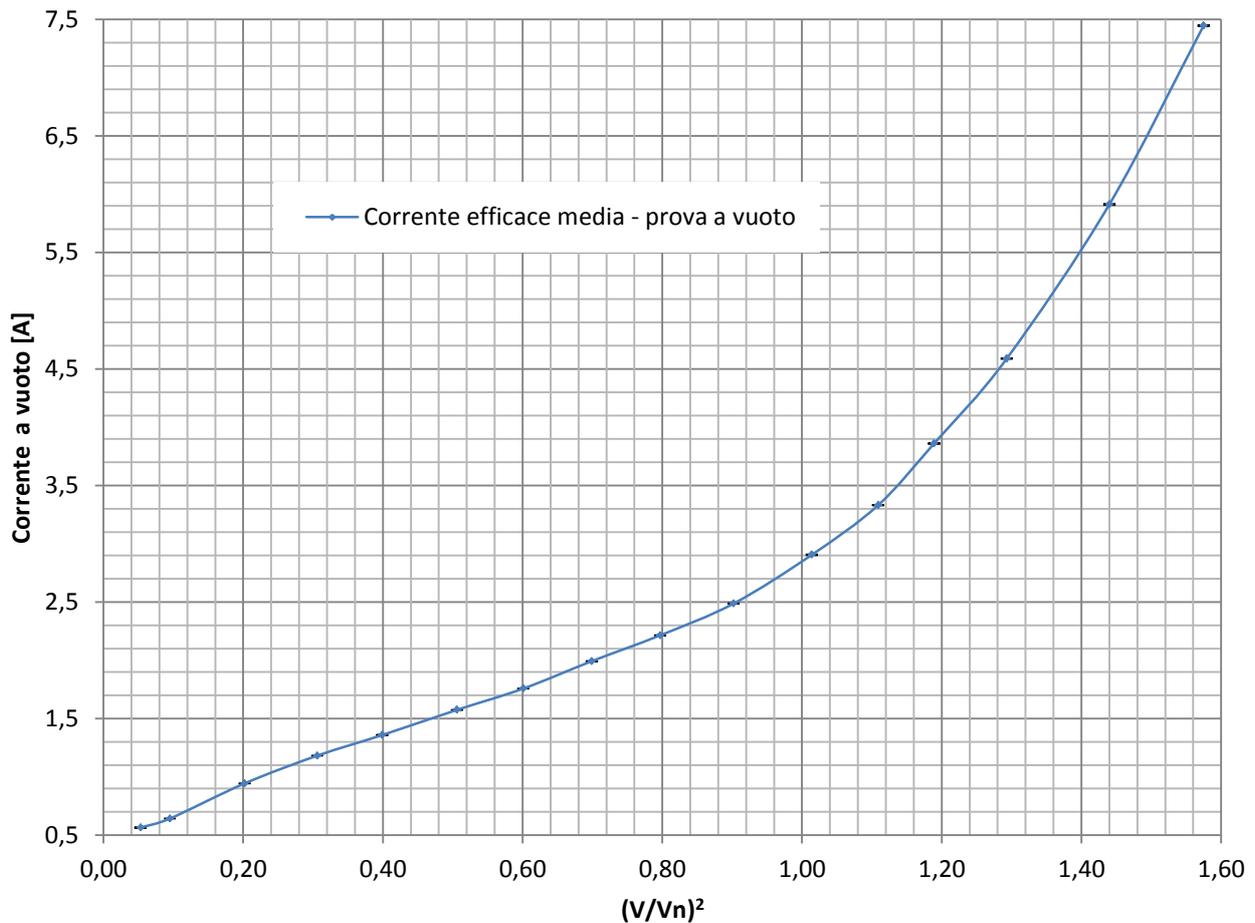


Fig. 14 – Corrente efficace media delle tre fasi durante la prova a vuoto, con incertezza tipo.

Tabella 5 – Valori centrali ed incertezze tipo per le misurazioni di potenza attiva totale delle tre fasi durante la prova a vuoto

Grandezza misurata	Valore centrale	Portata	Incertezza tipo	
Potenza attiva totale [W] nella prova a vuoto	$(V/V_n)^2 = 0.053$	41.61	180	0.06
	$(V/V_n)^2 = 0.095$	45.34	300	0.09
	$(V/V_n)^2 = 0.202$	62.60	450	0.16
	$(V/V_n)^2 = 0.306$	75.18	900	0.28
	$(V/V_n)^2 = 0.399$	88.20		0.32
	$(V/V_n)^2 = 0.506$	101.81	1800	0.51
	$(V/V_n)^2 = 0.601$	115.19		0.56
	$(V/V_n)^2 = 0.699$	128.09		0.63
	$(V/V_n)^2 = 0.797$	144.40	4500	1.08
	$(V/V_n)^2 = 0.902$	159.37		1.13
	$(V/V_n)^2 = 1.014$	184.48		1.28
	$(V/V_n)^2 = 1.109$	205.34		1.40
	$(V/V_n)^2 = 1.189$	239.99		1.55
	$(V/V_n)^2 = 1.293$	280.49	9000	1.77
	$(V/V_n)^2 = 1.440$	371.69		2.81
	$(V/V_n)^2 = 1.575$	462.99		3.29

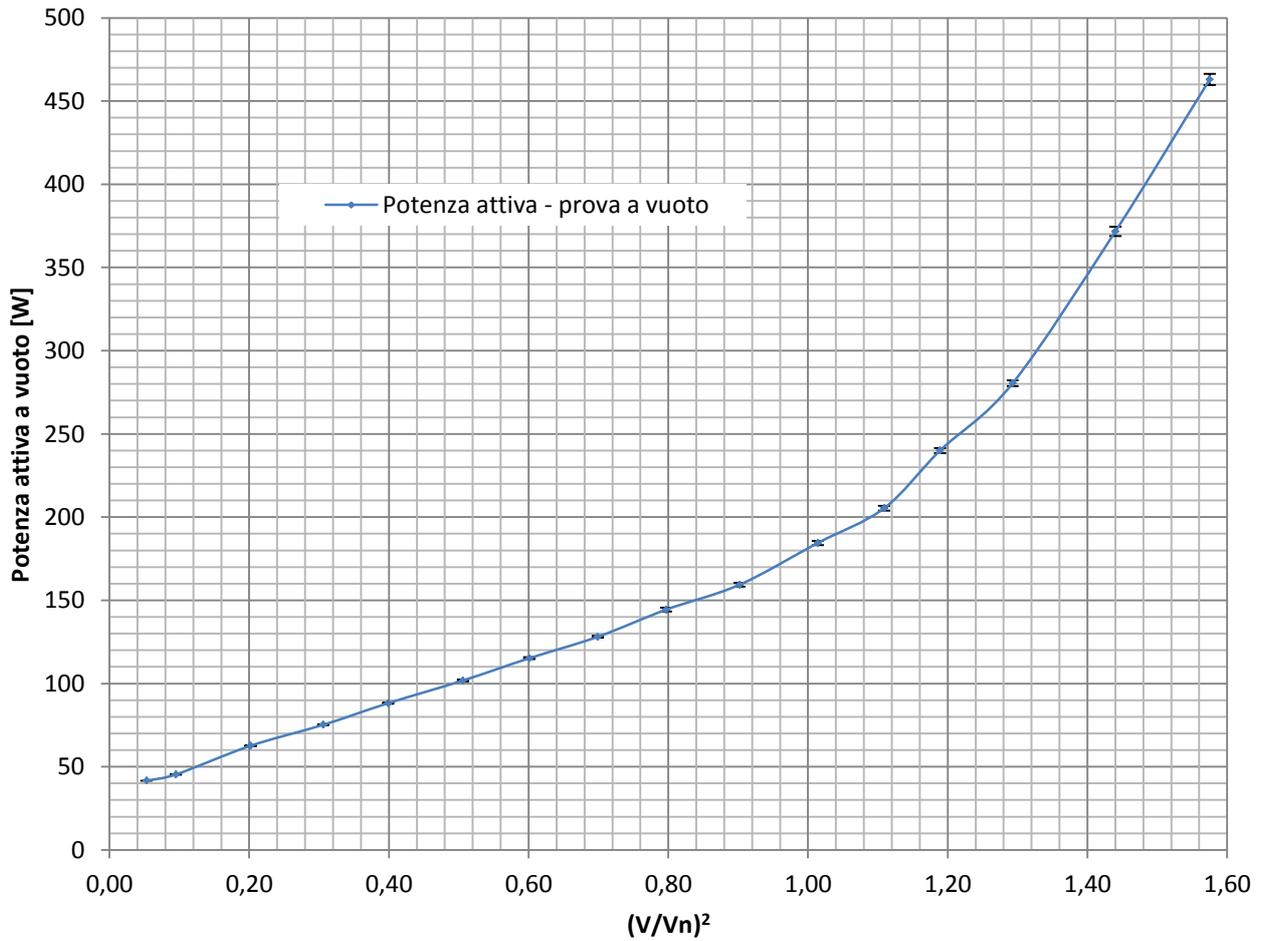


Fig. 15 – Potenza attiva durante la prova a vuoto, con incertezza tipo.

Tabella 6 – Valori centrali ed incertezze tipo per le misurazioni di tensione efficace media delle tre fasi durante la prova a carico

Grandezza misurata		Valore centrale	Portata	Incertezza tipo
Tensione efficace media [V] nella prova a carico	(C/C _n)= 0.259	232.10	300	0.11
	(C/C _n)= 0.528	231.59		
	(C/C _n)= 0.729	231.11		
	(C/C _n)= 1.007	230.80		
	(C/C _n)= 1.315	230.18		
	(C/C _n)= 1.633	230.09		

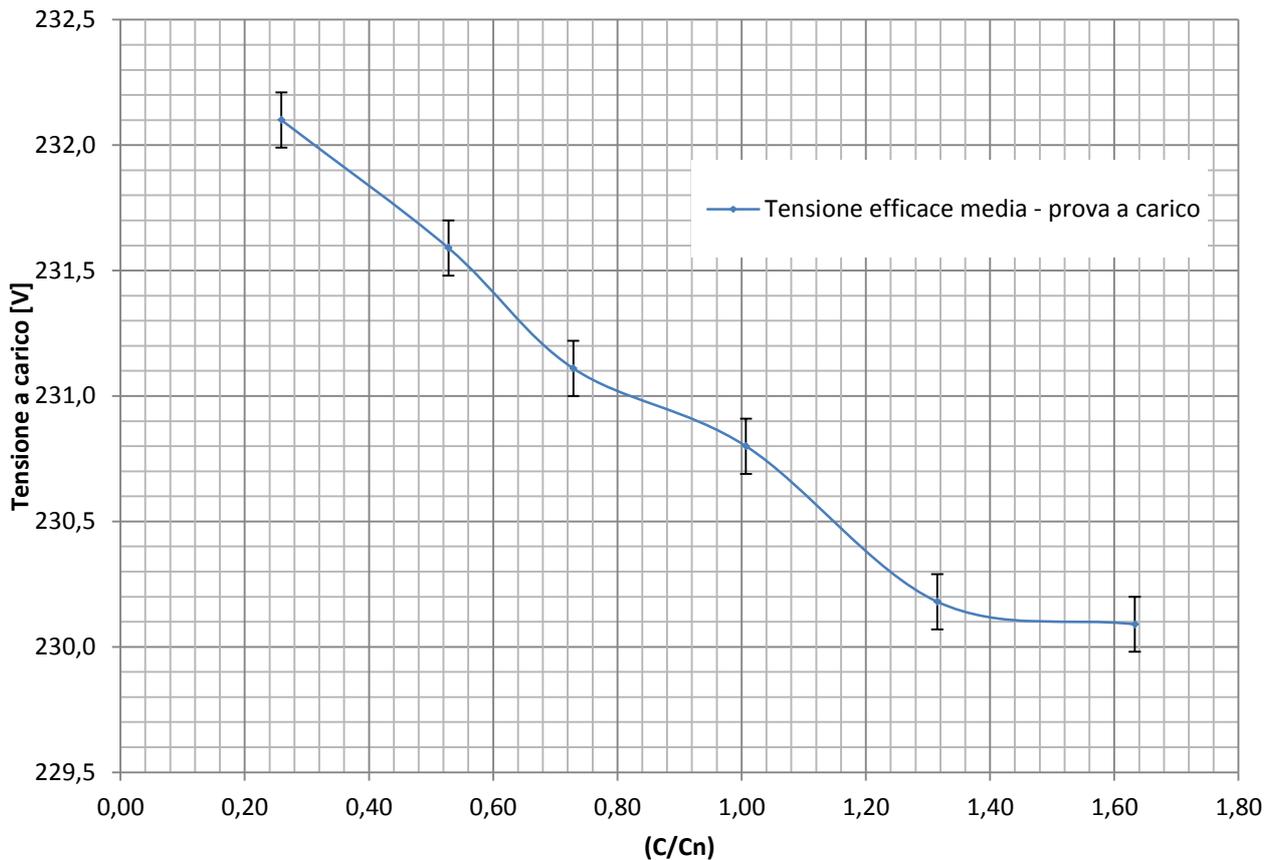


Fig. 16 – Tensione efficace media durante la prova a carico, con incertezza tipo.

Tabella 7 – Valori centrali ed incertezze tipo per le misurazioni di corrente efficace media delle tre fasi durante la prova a carico

Grandezza misurata		Valore centrale	Portata	Incertezza tipo
Corrente efficace media [A] nella prova a carico	(C/C _n)= 0.259	3.151	5	0.0016
	(C/C _n)= 0.528	3.872		0.0018
	(C/C _n)= 0.729	4,487		0.0020
	(C/C _n)= 1.007	5.739	10	0.0031
	(C/C _n)= 1.315	7.174		0.0035
	(C/C _n)= 1.633	8.740		0.0040

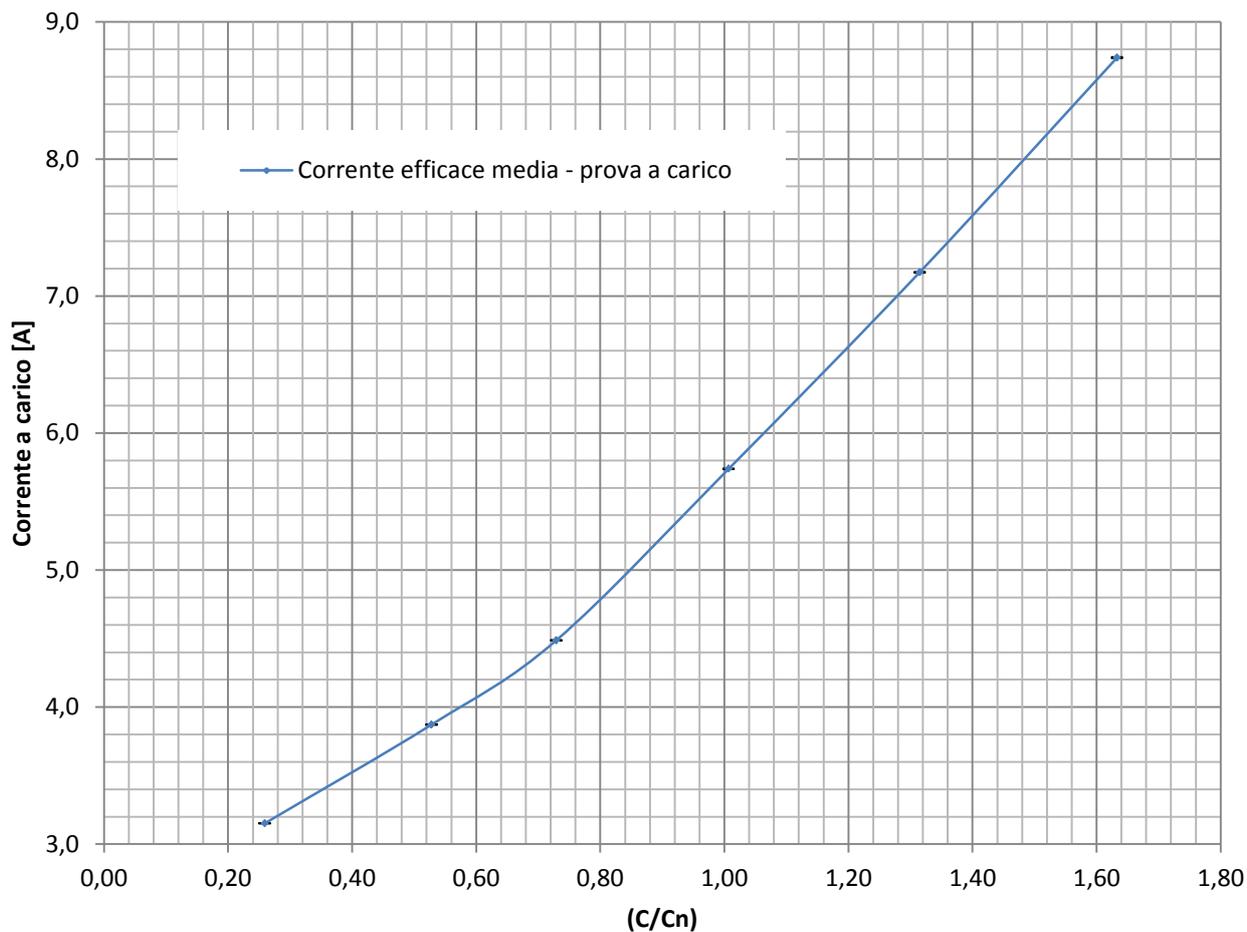


Fig. 17 – Corrente efficace media durante la prova a carico, con incertezza tipo.

Tabella 8 – Valori centrali ed incertezze tipo per le misurazioni di potenza attiva totale delle tre fasi durante la prova a carico

Grandezza misurata		Valore centrale	Portata	Incertezza tipo
Potenza attiva totale [W] nella prova a carico	(C/C _n)= 0.259	990.17	4500	1.50
	(C/C _n)= 0.528	1826.96		1.75
	(C/C _n)= 0.729	2456.63		1.91
	(C/C _n)= 1.007	3353.39	9000	2.88
	(C/C _n)= 1.315	4368.67		3.23
	(C/C _n)= 1.633	5446.79		3.62

Tabella 9 – Valori centrali ed incertezze tipo per le misurazioni di coppia durante la prova a carico

Grandezza misurata		Valore centrale	Portata	Incertezza tipo
Coppia [Nm] nella prova a carico	(C/C _n)= 0.259	2.49	20	0.023
	(C/C _n)= 0.528	5.08		
	(C/C _n)= 0.729	7.01		
	(C/C _n)= 1.007	9.69		
	(C/C _n)= 1.315	12.65		
	(C/C _n)= 1.633	15.71		

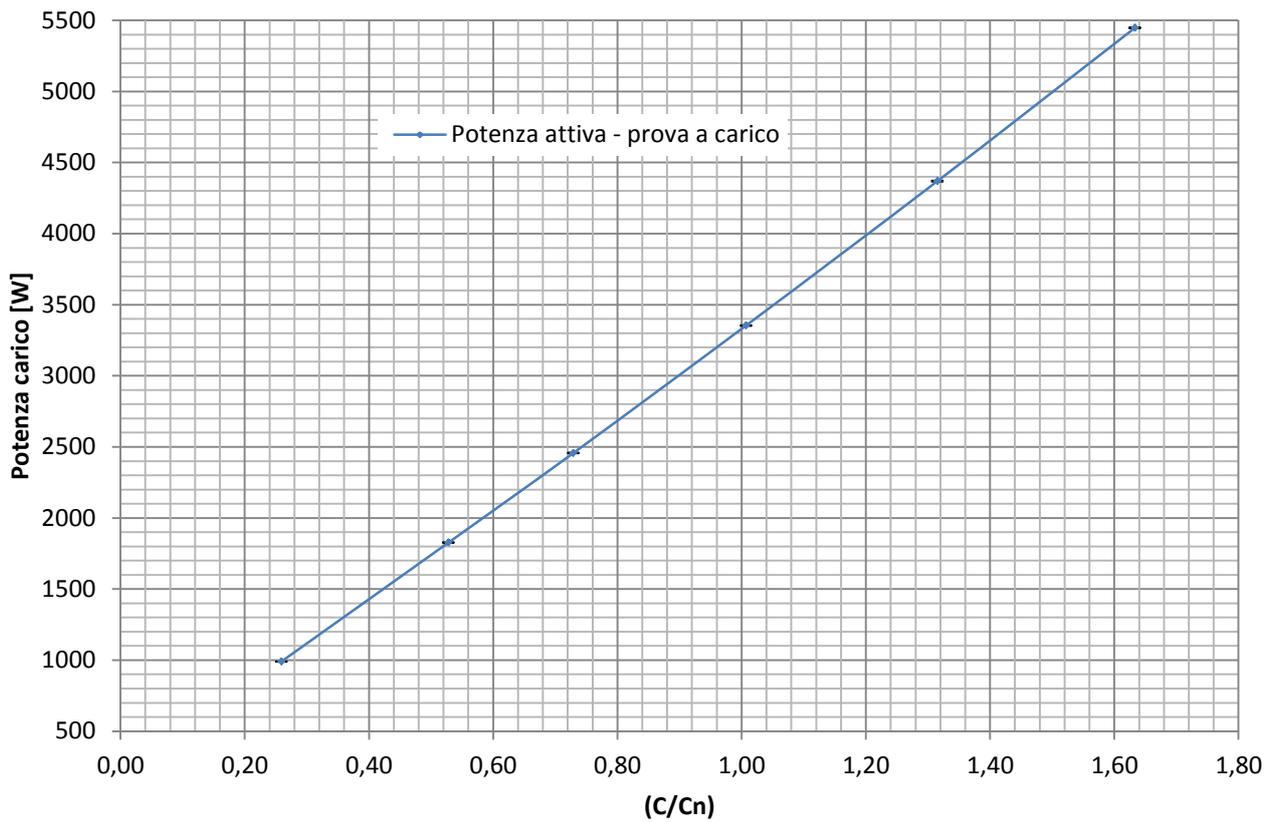


Fig. 18 – Potenza attiva durante la prova a carico, con incertezza tipo.

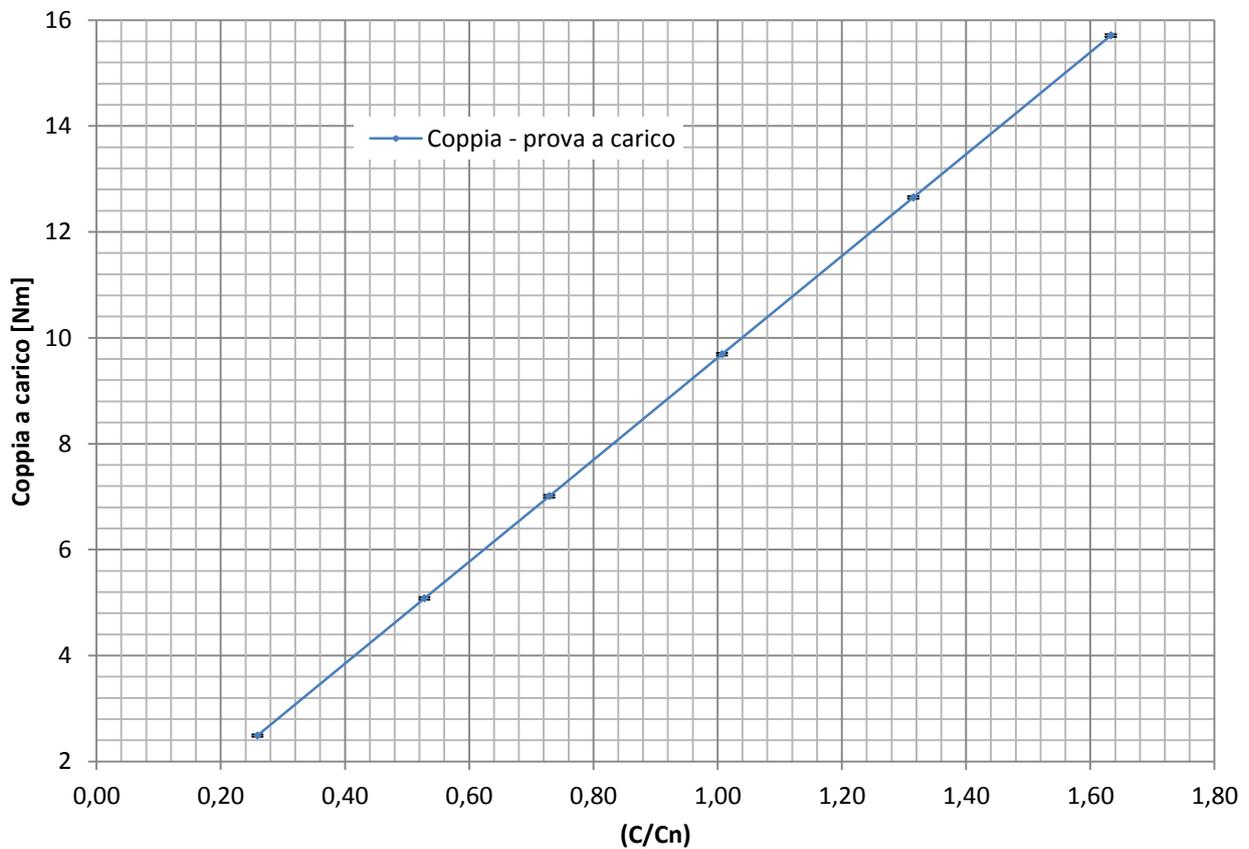


Fig. 19 – Coppia durante la prova a carico, con incertezza tipo.

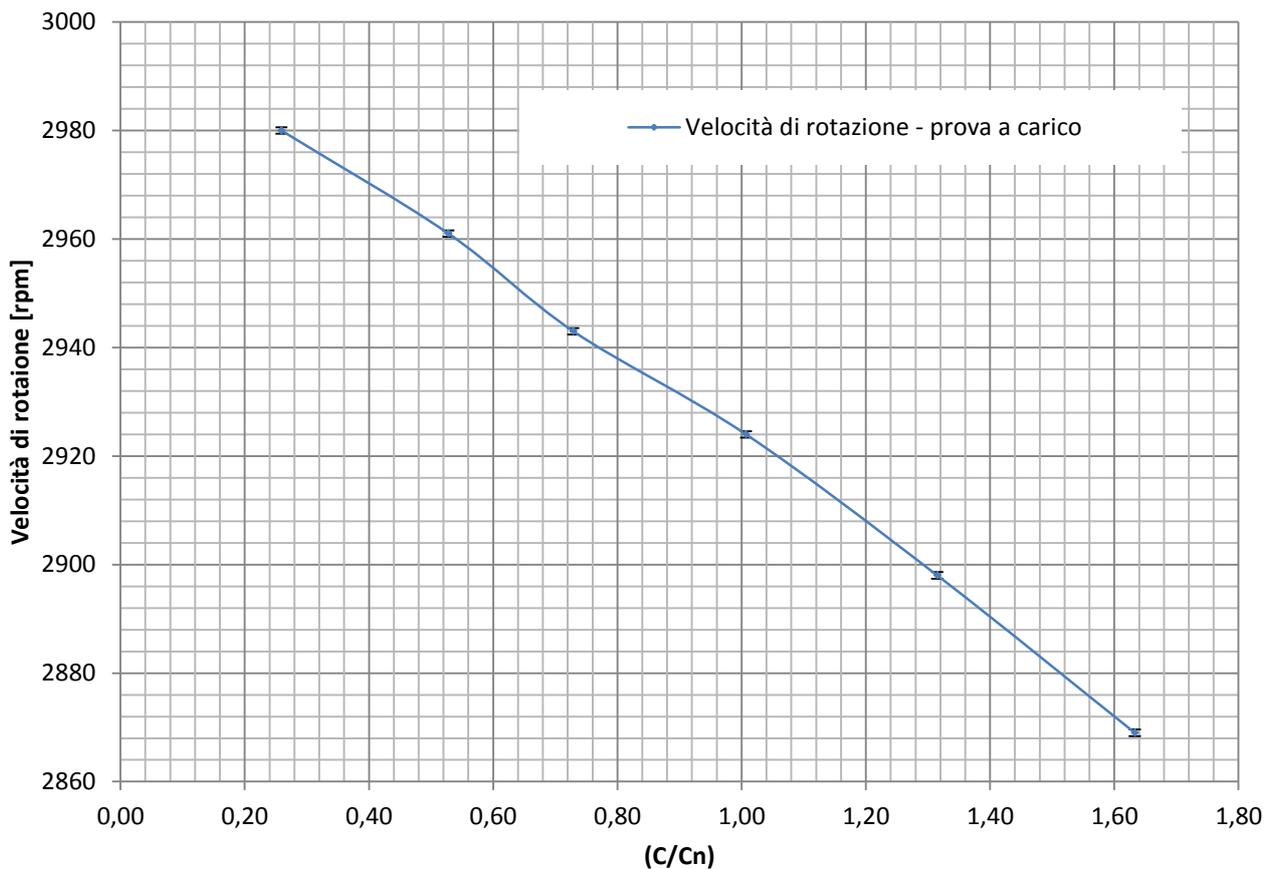


Fig. 19 – Velocità di rotazione durante la prova a carico, con incertezza tipo.

Tabella 10 – Valori centrali ed incertezze tipo per le misurazioni di velocità di rotazione durante la prova a carico

Grandezza misurata	Valore centrale	Portata	Incertezza tipo
Velocità di rotazione [rpm] nella prova a carico	(C/C _n)= 0.259	-	0.6
	(C/C _n)= 0.528		
	(C/C _n)= 0.729		
	(C/C _n)= 1.007		
	(C/C _n)= 1.315		
	(C/C _n)= 1.633		

Nelle tabelle seguenti sono riportati i valori centrali e le incertezze tipo per le grandezze derivate, con riferimento nella colonna di destra alle relazioni analitiche utilizzate per il loro calcolo e descritte precedentemente nel presente documento. Le stesse sono illustrate nelle Figure 20-26.

Tabella 11- Valori centrali ed incertezze tipo per la temperatura degli avvolgimenti di statore durante la prova a carico θ_w e per il fattore di correzione della temperatura k_θ

Grandezza misurata	Valore centrale	Incertezza tipo	Relazione di riferimento
θ_w [°C]	60.7	0.8	(8)-(12)
k_θ	0.976	0.001	(13)-(16)

Tabella 12- Valori centrali ed incertezze tipo per le perdite costanti P_{ki}

Grandezza misurata	Valore centrale	Incertezza tipo	Relazione di riferimento
P_{ki} [W]	39.99	0.06	(17)-(21)
	43.74	0.09	
	59.15	0.16	
	69.76	0.28	
	81.04	0.32	
	92.19	0.51	
	103.20	0.56	
	112.68	0.63	
	125.37	1.08	
	135.38	1.13	
	151.72	1.28	
	162.27	1.40	
	182.15	1.55	
	198.77	1.77	
	236.01	2.81	
247.70	3.29		

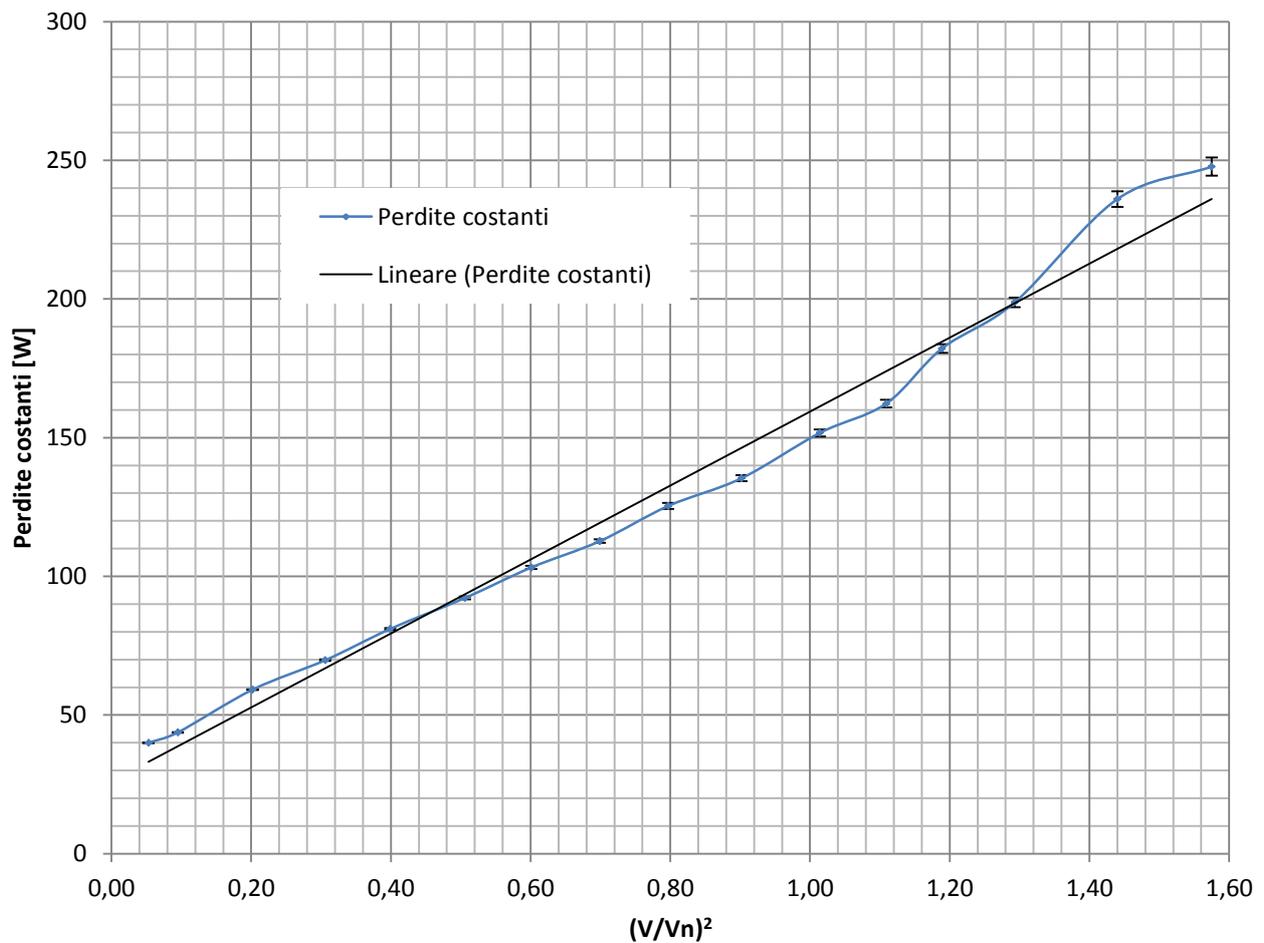


Fig. 20 – Valori centrali, con linea di tendenza, ed incertezze tipo per le perdite costanti P_{ki}

Tabella 13- Valori centrali ed incertezze tipo per il coefficiente C , le perdite per attrito e ventilazione P_{fw} ed il coefficiente di correlazione $r(P_{ki}, U_{0j})$

Grandezza misurata	Valore centrale	Incertezza tipo	Relazione di riferimento
$C [W/V^2]$	0.002521	0.00015	(22),(23), (28)-(30)
$P_{fw} [W]$	26.02	1.27	(22), (24)-(27)
$r(P_{ki}, U_{0j})$	0.992	-	(27)

Tabella 14- Valori centrali ed incertezze tipo per la tensione U_r e le perdite nel ferro P_{fe}

Grandezza misurata	Valore centrale	Incertezza tipo	Relazione di riferimento
$U_r [V]$	231.08	0.94	(31)- (38)
	229.70	0.96	
	228.56	0.98	
	227.32	1.02	
	225.63	1.09	
	224.42	1.17	
$P_{fe} [W]$	134.62	1.36	(39)-(40)
	133.02	1.37	
	131.70	1.38	
	130.27	1.41	
	128.34	1.45	
	126.96	1.53	

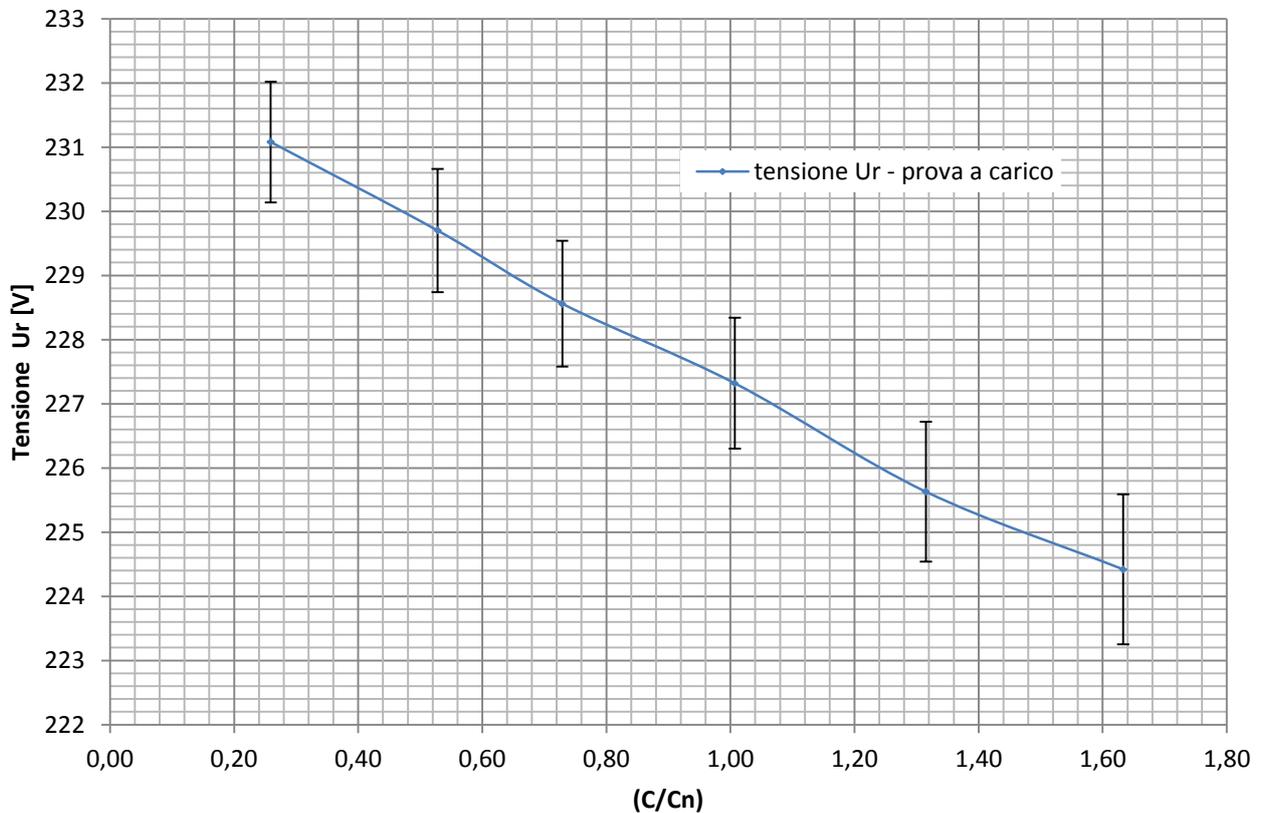


Fig. 21 – Valori centrali ed incertezze tipo per la tensione U_r

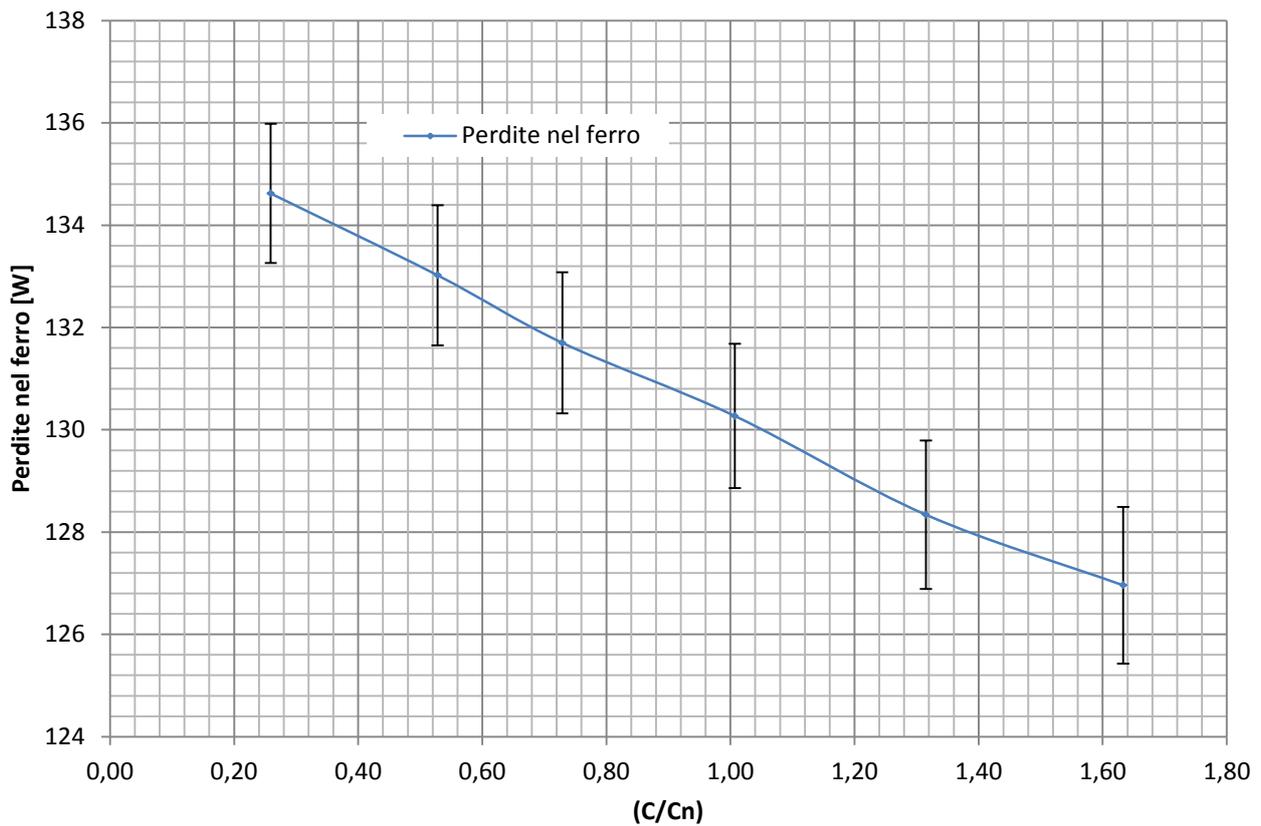


Fig. 22 – Valori centrali ed incertezze tipo per le perdite nel ferro P_{fe}

Tabella 14- Valori centrali ed incertezze tipo per le perdite di statore $P_{s,\theta}$, lo scorrimento s_θ e le perdite di rotore $P_{r,\theta}$

Grandezza misurata	Valore centrale	Incertezza tipo	Relazione di riferimento
$P_{s,\theta}$ [W]	41.95	0.09	(41)-(43)
	63.33	0.13	
	85.04	0.18	
	139.13	0.30	
	217.39	0.46	
	322.65	0.68	
s_θ	0.00651	0.00061	(45), (47), (49)
	0.01269	0.00061	
	0.01855	0.00061	
	0.02473	0.00060	
	0.03319	0.00060	
	0.04263	0.00059	
$P_{r,\theta}$ [W]	5.29	0.50	(44)-(50)
	20.70	0.99	
	41.55	1.36	
	76.28	1.86	
	133.54	2.41	
	213.04	2.98	

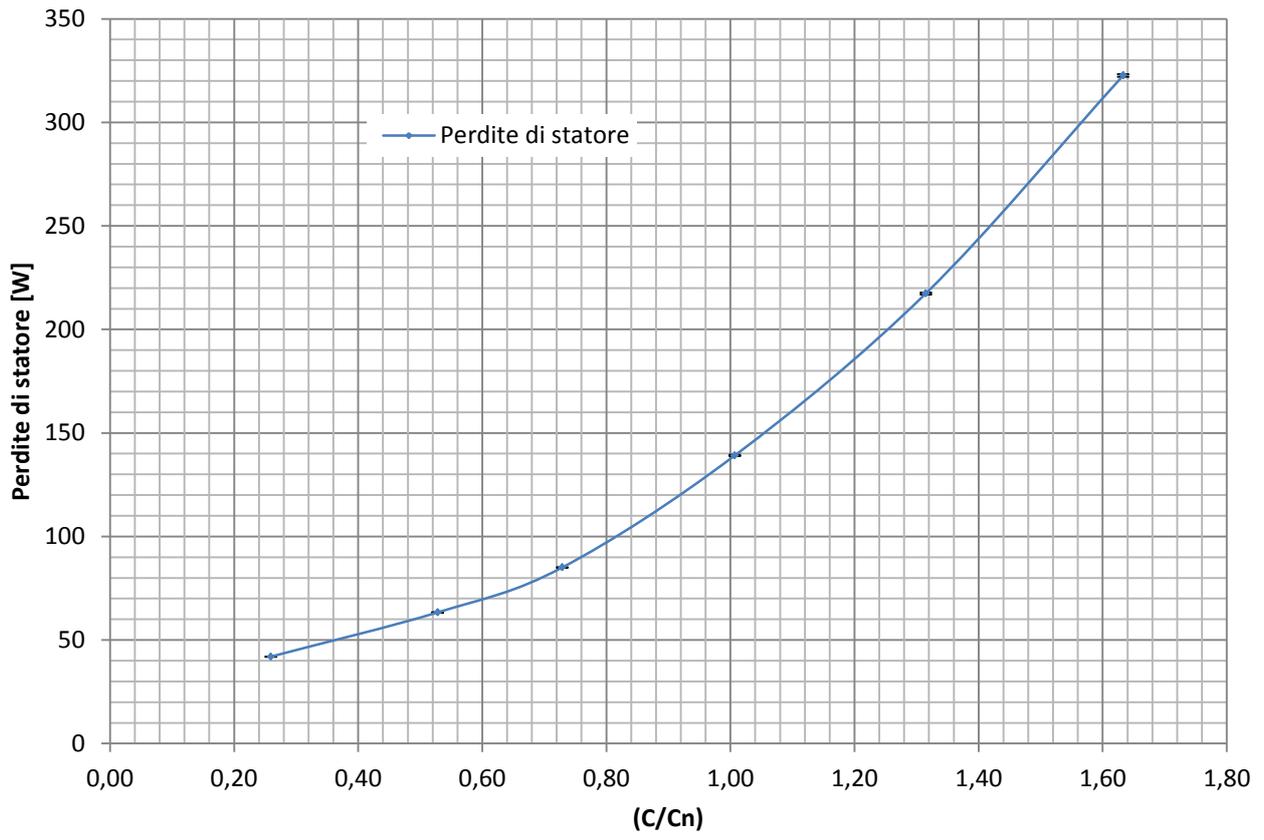


Fig. 23 – Valori centrali ed incertezze tipo per le perdite di statore $P_{s,\theta}$

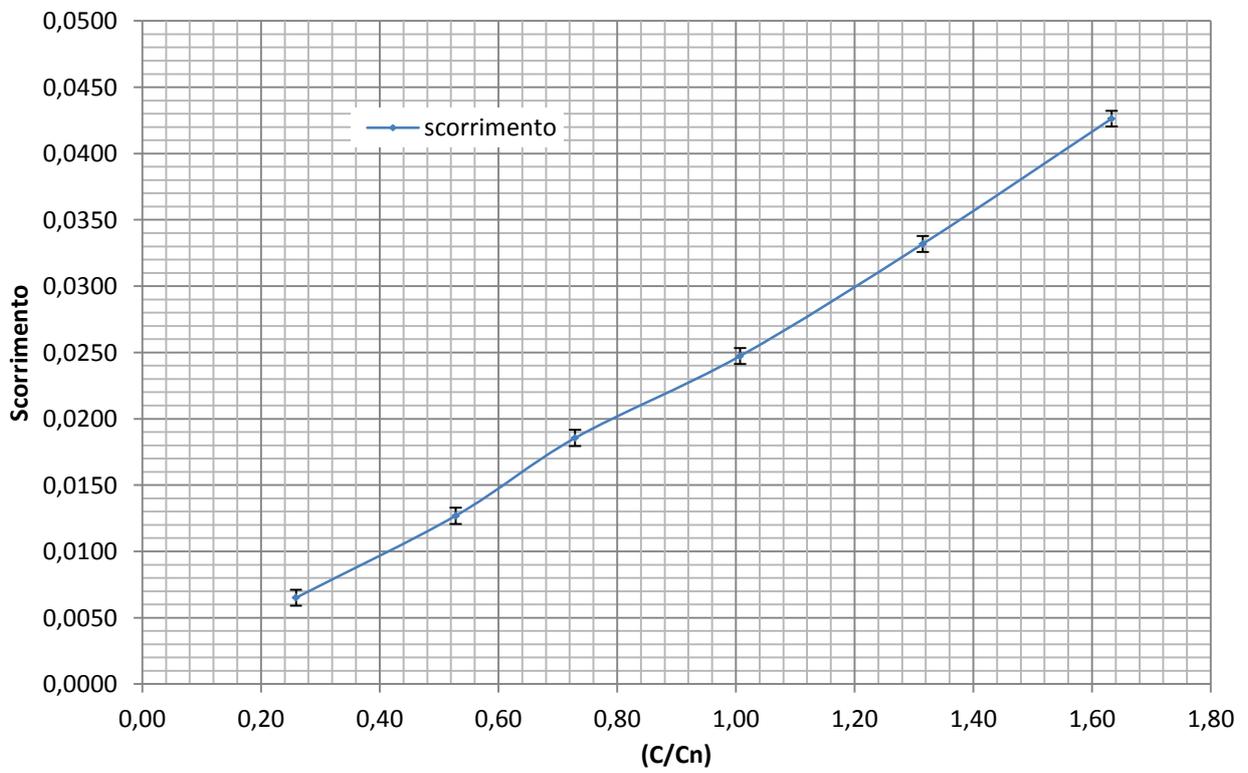


Fig. 23 – Valori centrali ed incertezze tipo per lo scorrimento s_θ

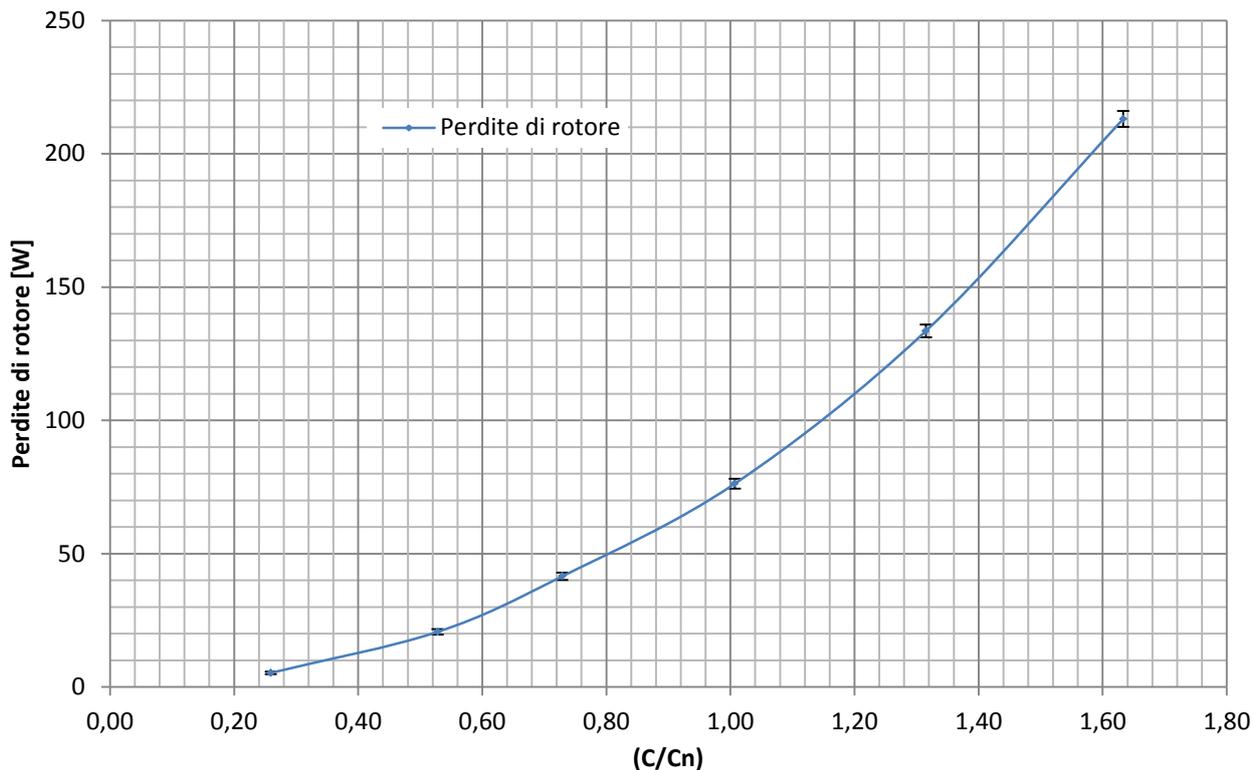


Fig. 24 – Valori centrali ed incertezze tipo per le perdite di rotore $P_{r,\theta}$

Tabella 15- Valori centrali ed incertezze tipo per la potenza meccanica in uscita P_2

Grandezza misurata	Valore centrale	Incertezza tipo	Relazione di riferimento
P_2 [W]	777.041	7.18	(52)
	1575.18	7.14	
	2160.41	7.10	
	2967.08	7.07	
	3838.99	7.02	
	4719.93	6.98	

Tabella 16- Valori centrali ed incertezze tipo per le perdite aggiuntive P_{Lr}

Grandezza misurata	Valore centrale	Incertezza tipo	Relazione di riferimento
P_{Lr} [W]	5.25	7.58	(51), (53)
	8.72	7.65	
	11.90	7.71	
	14.62	8.09	
	24.38	8.34	
	38.18	8.67	

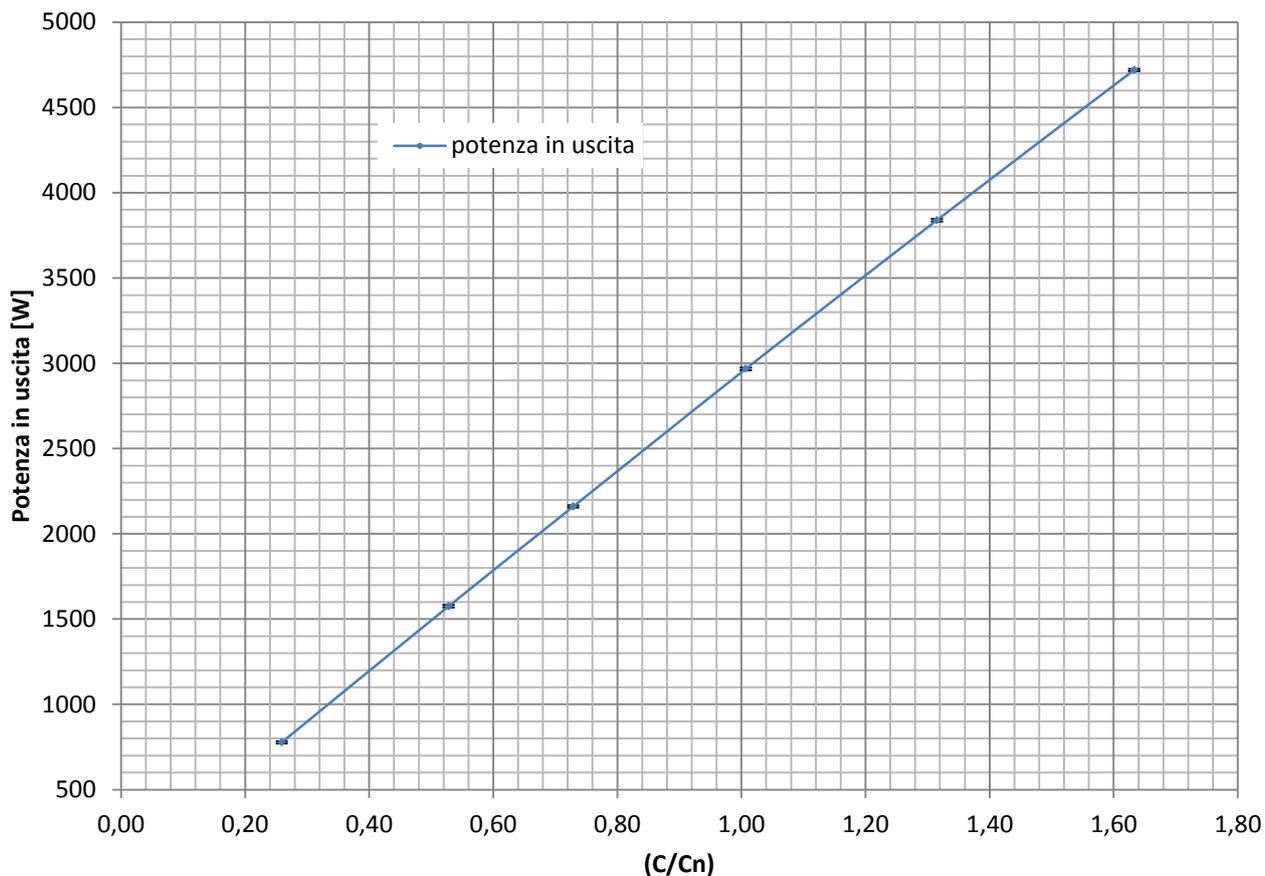


Fig. 25 – Valori centrali ed incertezze tipo per la potenza meccanica in uscita P_2

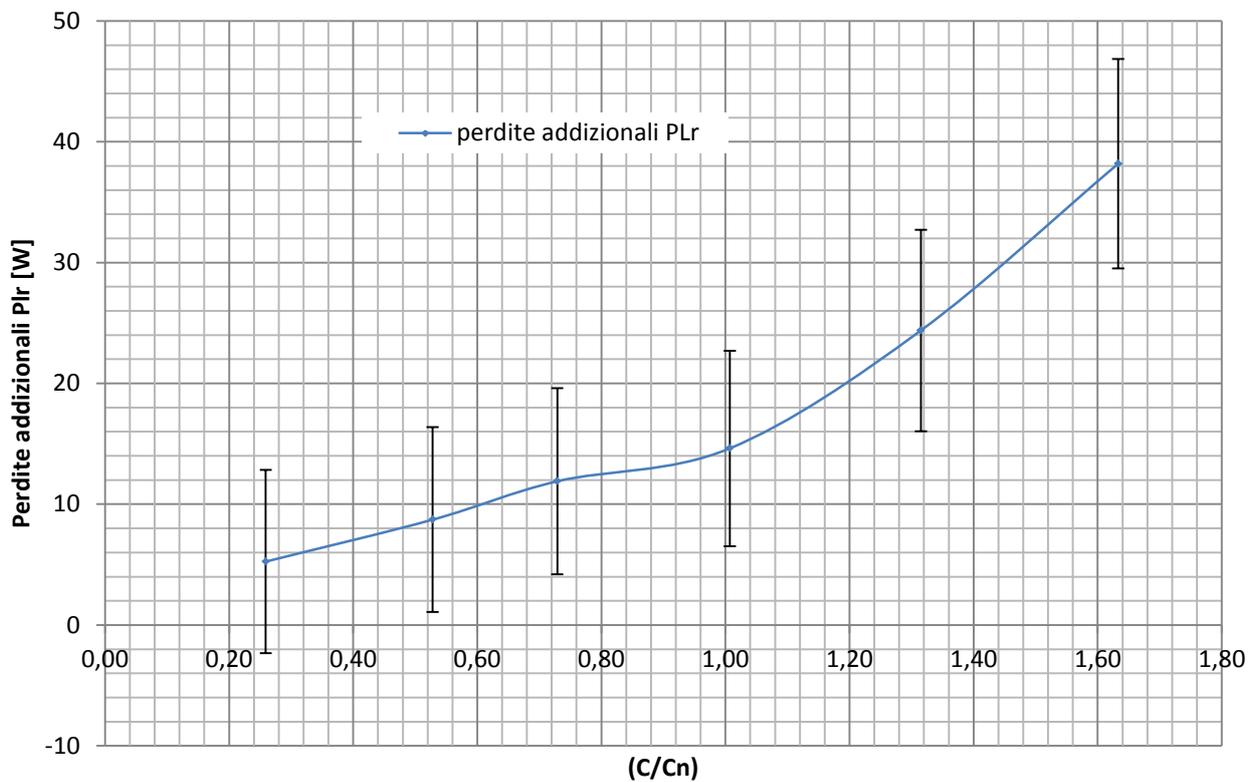


Fig. 25 – Valori centrali ed incertezze tipo per le perdite addizionali P_{Lr}

Tabella 17- Valori centrali ed incertezze tipo per il coefficiente A, il fattore di correlazione γ e le perdite aggiuntive P_{LL}

Grandezza misurata	Valore centrale	Incertezza tipo	Relazione di riferimento
$A [W/(Nm)^2]$	0.132	0.041	(54)-(62)
γ	0.993	-	(57)
$P_{LL}[W]$	0.82	0.25	(58)-(63)
	3.40	1.06	
	6.48	2.02	
	12.39	3.85	
	21.11	6.56	
	32.56	10.11	

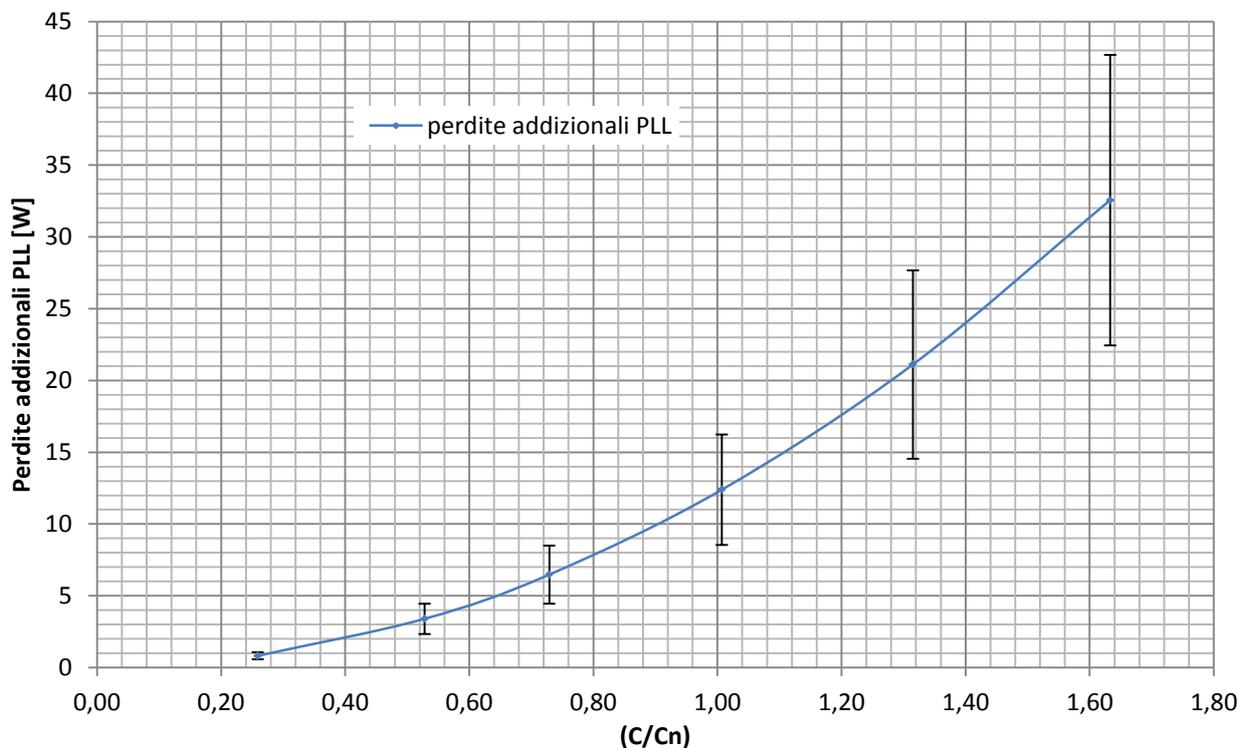


Fig. 26 – Valori centrali ed incertezze tipo per le perdite aggiuntive P_{LL}

Nelle Tabelle 18 e 19 sono riportati i valori di efficienza ed incertezza tipo ottenuti con il metodo indiretto e diretto rispettivamente, in funzione della potenza meccanica in uscita. I risultati sono riportati anche nelle Figure 27-30.

Tabella 18- Valori centrali ed incertezze tipo per l'efficienza ottenuta con il metodo indiretto

Potenza meccanica in uscita [W]	Efficienza con metodo indiretto	
	Valore centrale	Incertezza tipo
777.041	0.78923	0.00199
1575.18	0.86509	0.00130
2160.41	0.88162	0.00125
2967.08	0.88546	0.00140
3838.99	0.87950	0.00166
4719.93	0.86758	0.00197

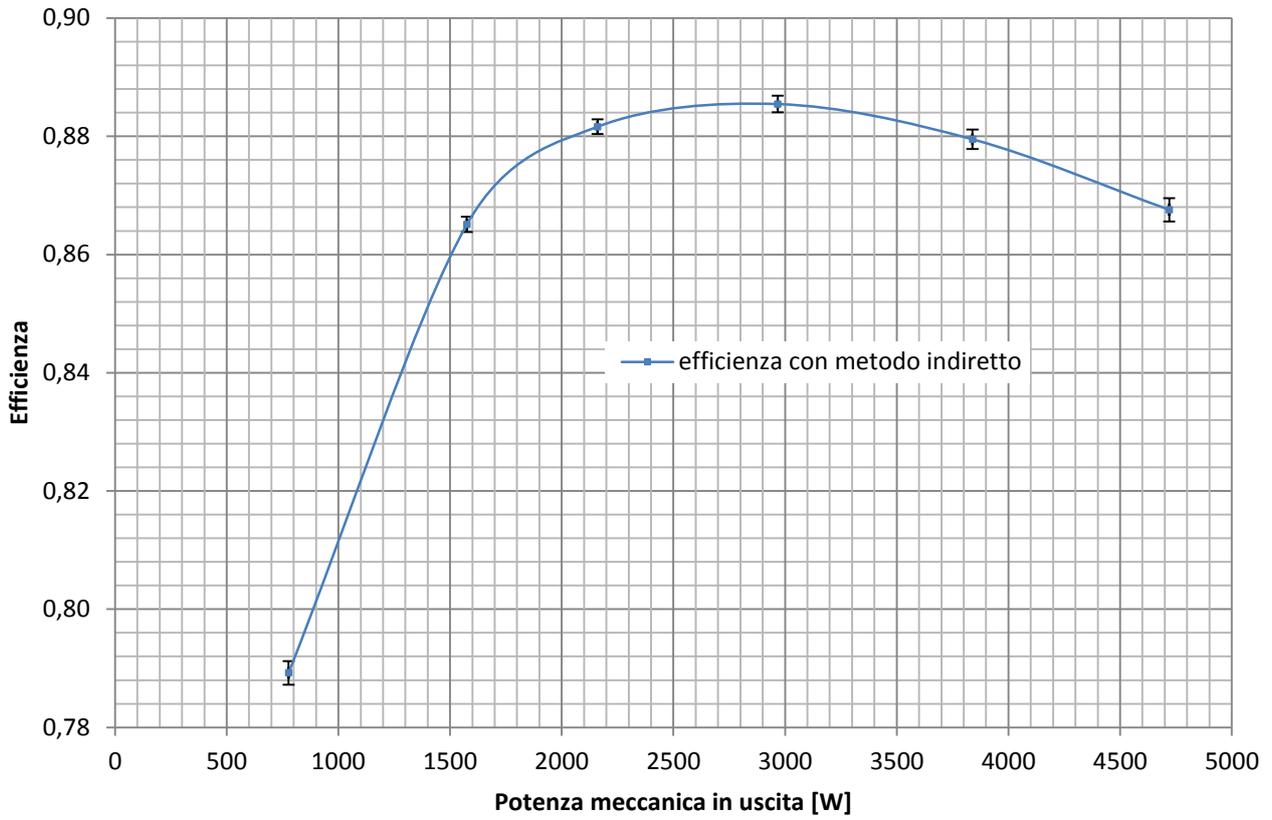


Fig. 27 - Valori centrali ed incertezze tipo per l'efficienza ottenuta con il metodo indiretto

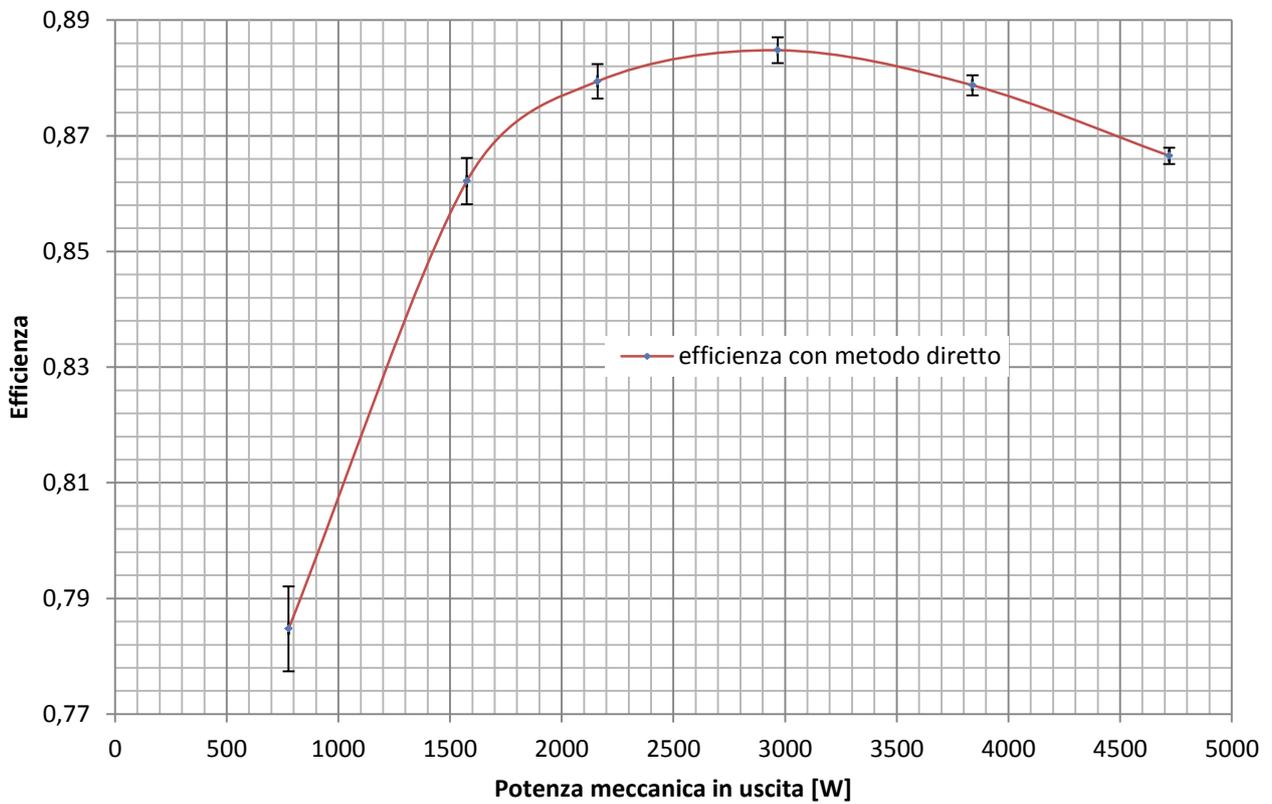


Fig. 27 - Valori centrali ed incertezze tipo per l'efficienza ottenuta con il metodo diretto

Tabella 19- Valori centrali ed incertezze tipo per l'efficienza ottenuta con il metodo diretto

Potenza meccanica in uscita [W]	Efficienza con metodo diretto	
	Valore centrale	Incertezza tipo
777.041	0.78475	0.00734
1575.18	0.86218	0.00399
2160.41	0.87942	0.00297
2967.08	0.88480	0.00224
3838.99	0.87875	0.00173
4719.93	0.86655	0.00140

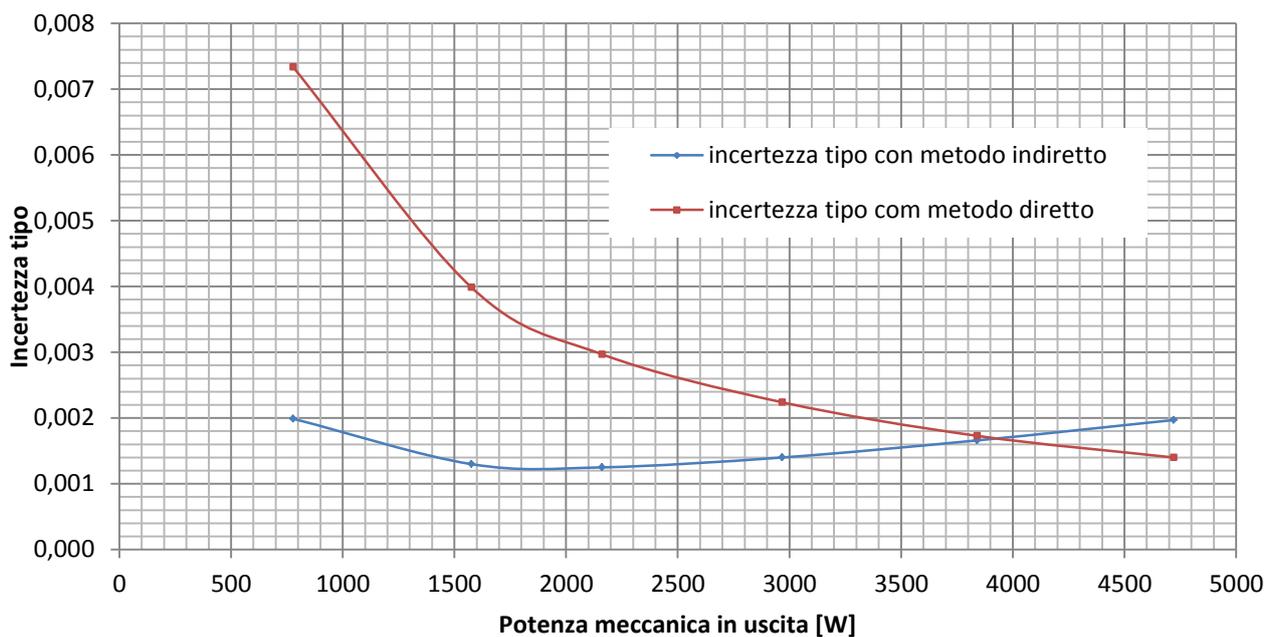


Fig. 28 – Confronto tra le incertezze tipo per l'efficienza ottenute con il metodo diretto ed indiretto

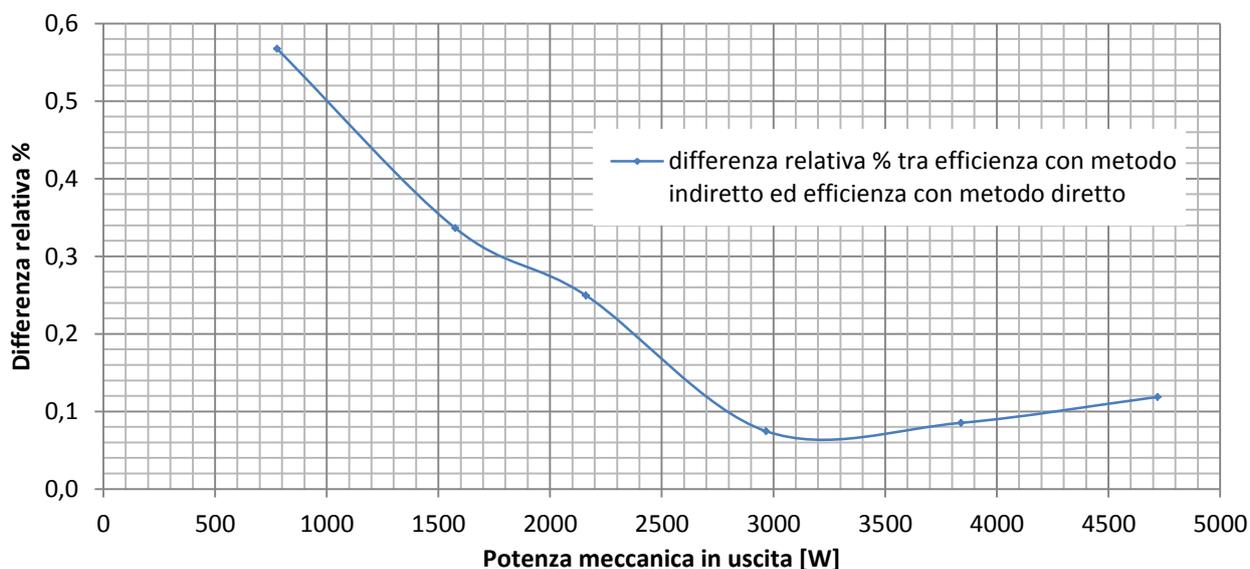


Fig. 29 – Differenza relativa % tra efficienza con metodo indiretto ed efficienza con metodo diretto

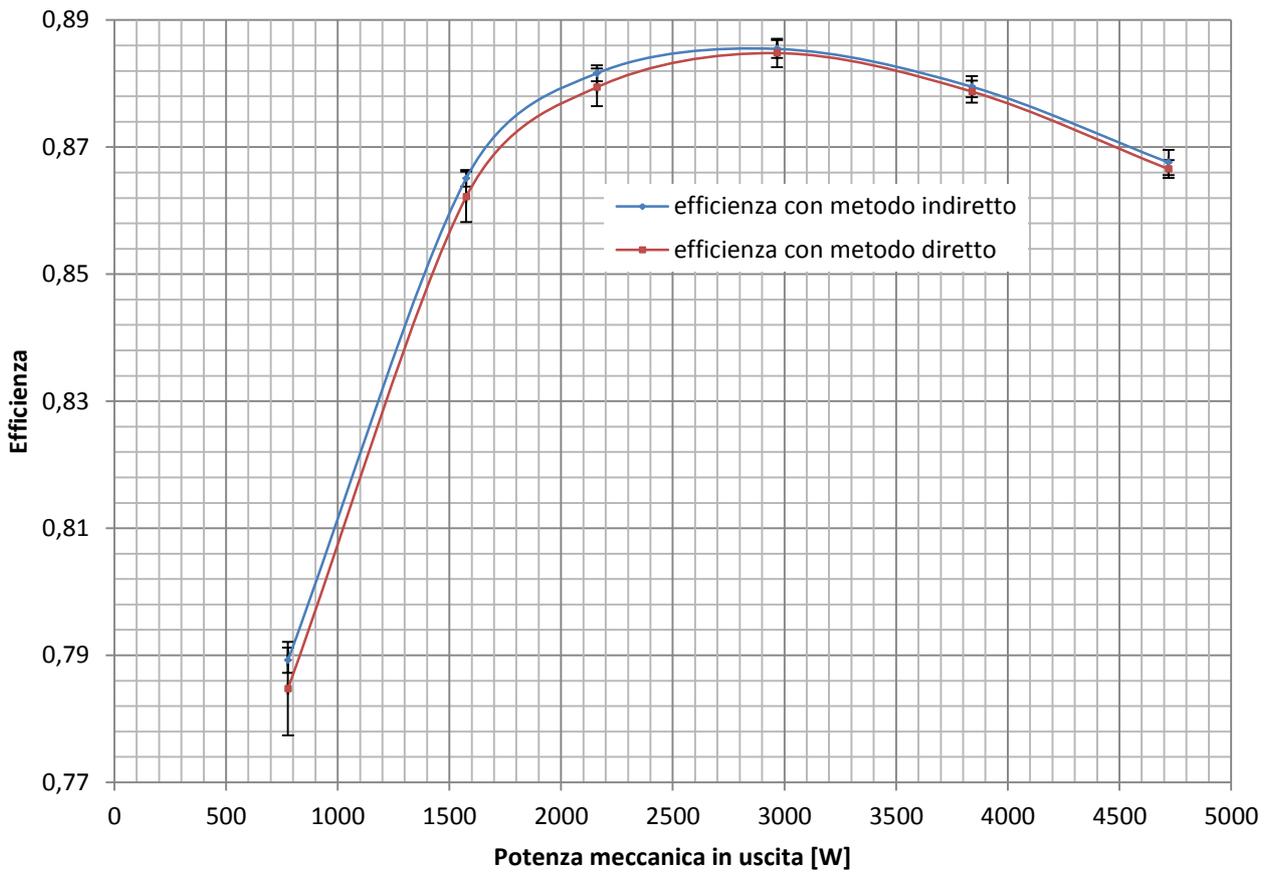


Fig. 30 – Confronto tra efficienza con metodo indiretto ed efficienza con metodo diretto, con incertezze tipo.

I risultati illustrati in Fig. 30 dimostrano che sussiste compatibilità tra le misurazioni ottenute con il metodo indiretto ed il metodo diretto, per il caso in esame, anche solo considerando l'incertezza tipo ponendo il fattore di copertura pari ad 1.

Si rammenta che, per quanto riguarda risultati di misurazioni per i quali è d'obbligo considerare l'incertezza associata, due misurazioni si considerano compatibili se sussiste una condizione di sovrapposibilità anche puntuale tra i due insiemi di valori, che risultano individuati in maniera univoca definendone il valore centrale e l'ampiezza, come illustrato dalla Figura 31.

Per evidenziare tale condizione di compatibilità tra misure, sono riportati i grafici con i valori di efficienza per ogni punto di lavoro, nelle Figure 32-38, con gli intervalli che identificano le incertezze tipo.

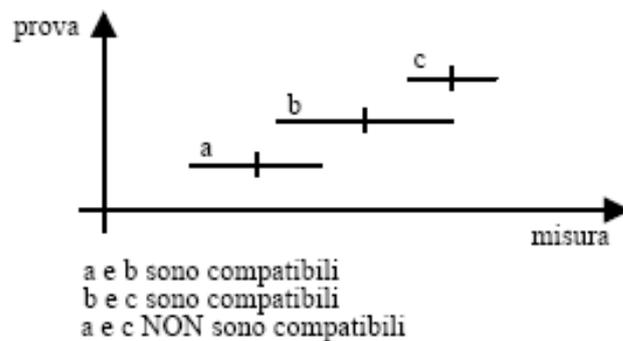


Fig.31 – Il concetto di compatibilità tra misure

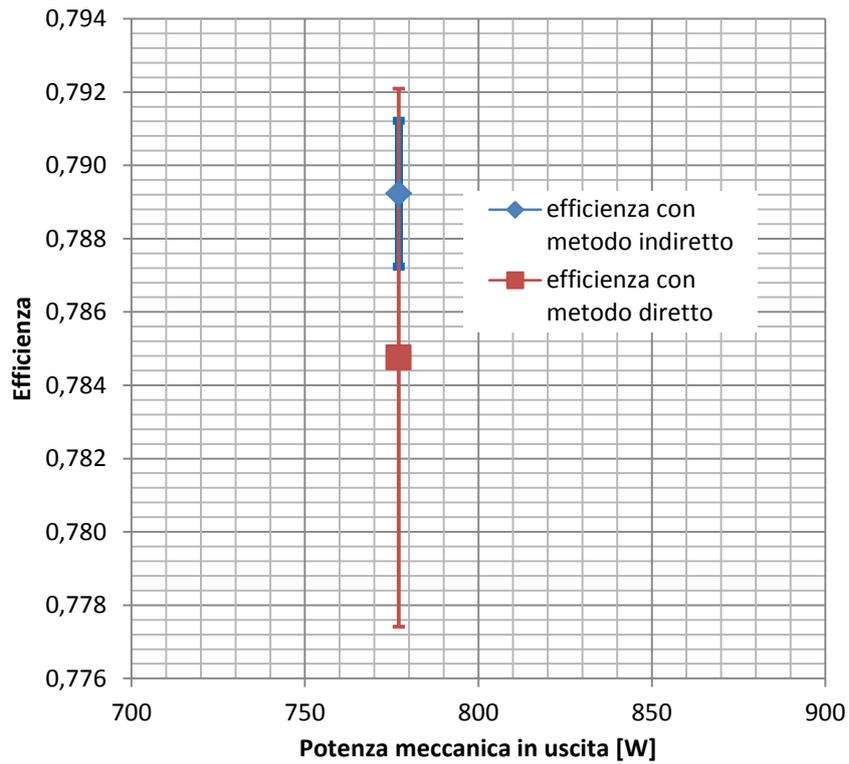


Fig. 32 – Compatibilità tra misure di efficienza con metodo diretto ed indiretto, al 25% circa del carico nominale.

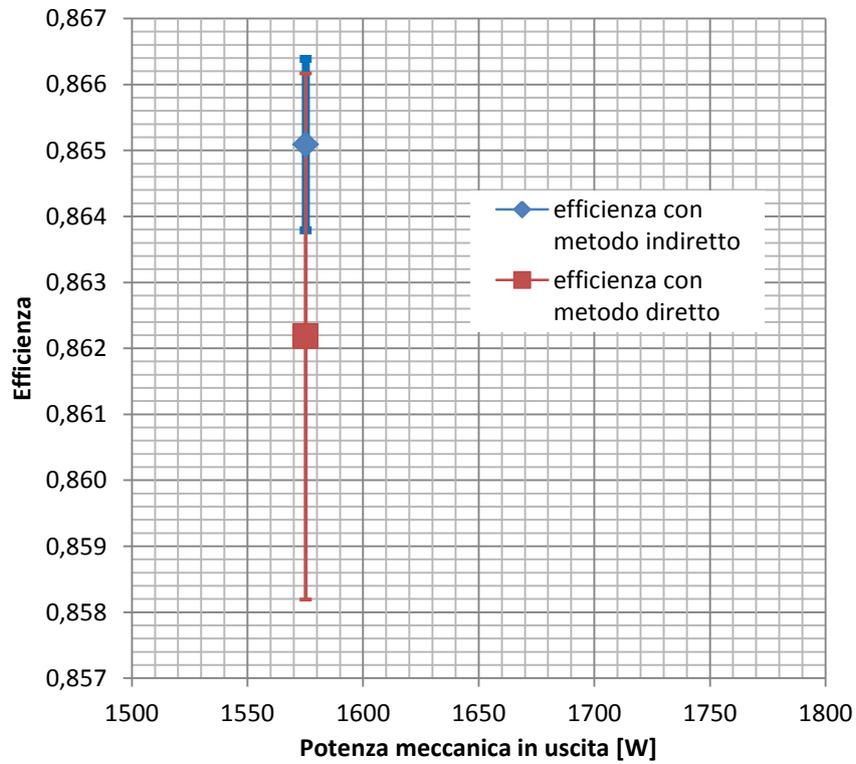


Fig. 32 – Compatibilità tra misure di efficienza con metodo diretto ed indiretto, al 50% circa del carico nominale.

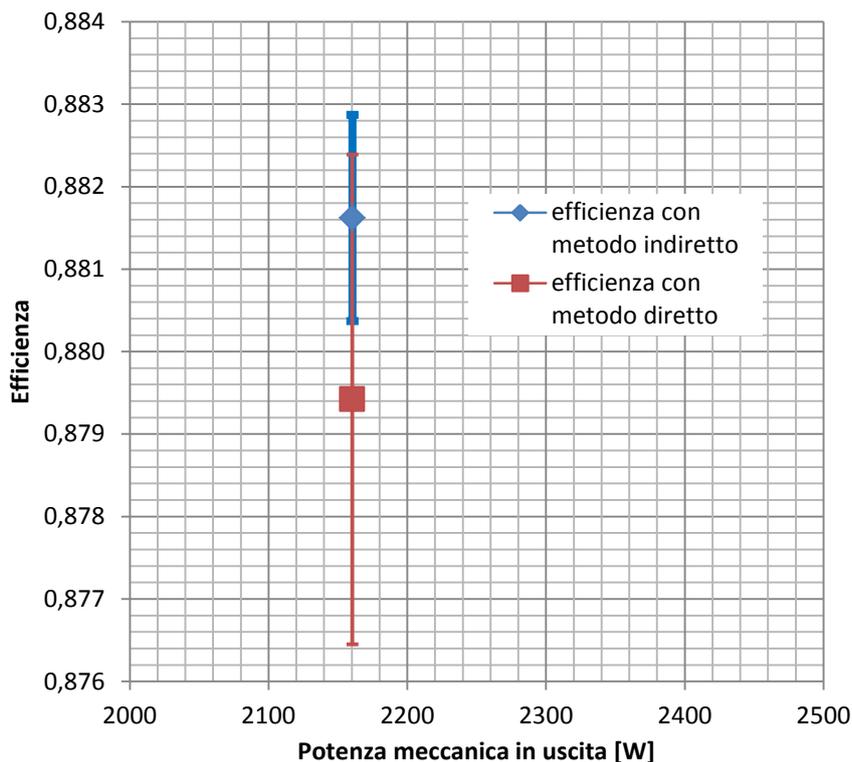


Fig. 32 – Compatibilità tra misure di efficienza con metodo diretto ed indiretto, al 75% circa del carico nominale.

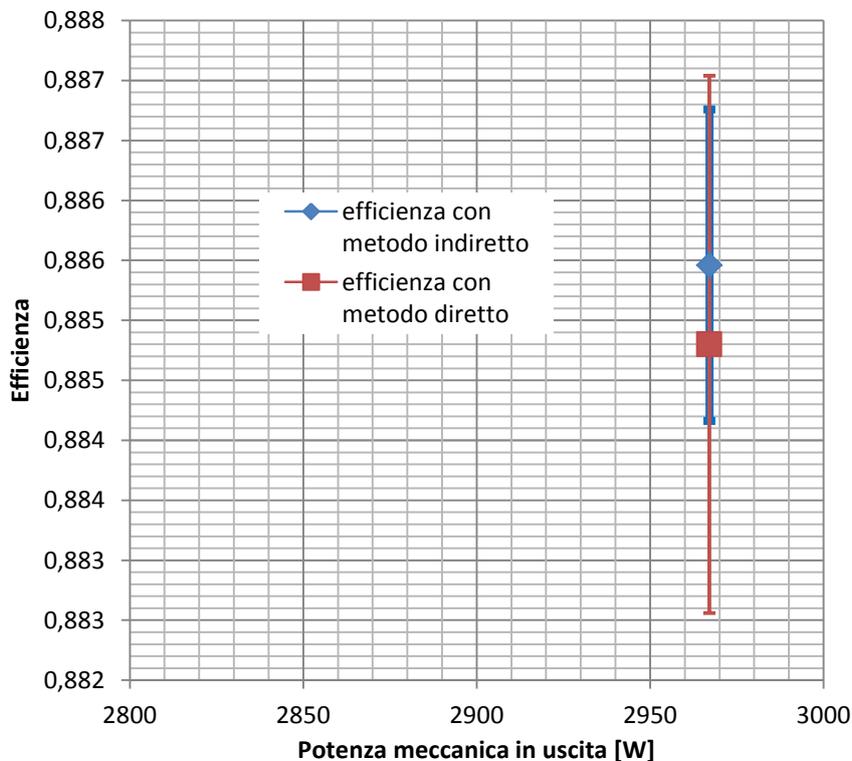


Fig. 32 – Compatibilità tra misure di efficienza con metodo diretto ed indiretto, al 100% circa del carico nominale.

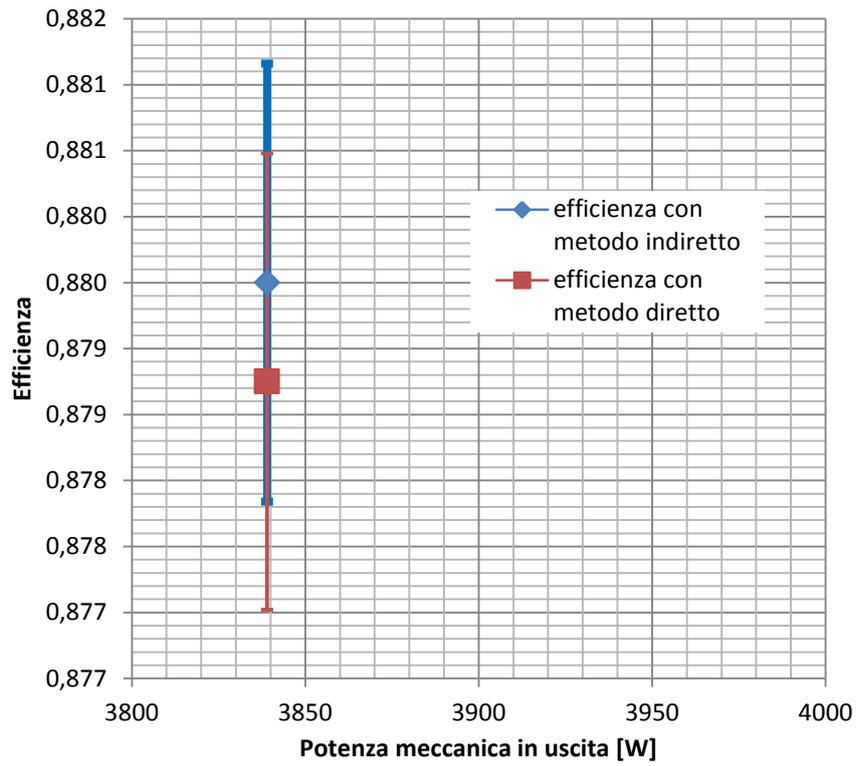


Fig. 32 – Compatibilità tra misure di efficienza con metodo diretto ed indiretto, al 125% circa del carico nominale.

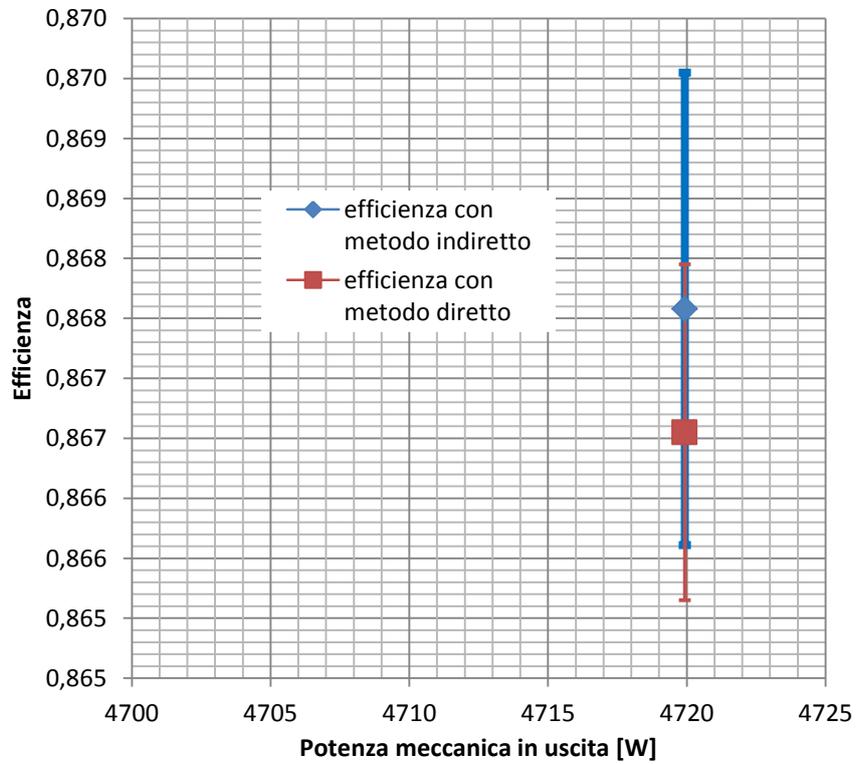


Fig. 32 – Compatibilità tra misure di efficienza con metodo diretto ed indiretto, al 150% circa del carico nominale.

Le incertezze tipo ottenute con i metodi diretto ed indiretto hanno lo stesso ordine di grandezza, e si osserva che i punti di funzionamento a carico maggiore il metodo diretto presenta incertezze minori. Al funzionamento nel punto di carico nominale, la differenza tra i valori centrali di efficienza ottenuti con i due metodi è pari al 0.074%.

Si osserva che potrebbe essere da valutare l'effetto dell'impiego di un trasduttore di coppia di classe di precisione superiore, ad esempio 0.1, oggi facilmente reperibile sul mercato; a livello di relazioni tra incertezza e precisione del trasduttore di coppia, si può intuire che la riduzione di incertezza sarà di modesta entità per la misura di efficienza con metodo diretto, mentre ci si aspetta che sia più rilevante per il metodo diretto.

Tale previsione è confermata dai risultati presentati nelle Tabelle 20 e 21, che riportano le incertezze tipo nelle ipotesi che siano adottati due trasduttori di classe di precisione 0.2 e classe 0.1 rispettivamente, senza modifiche sul valore di coppia misurato. In Figura 33 sono confrontati graficamente i valori delle incertezze tipo; si quindi osserva che, con l'acquisto di un trasduttore di coppia di classe superiore alla 0.2 prescritta dalla norma, si possa sensibilmente ridurre l'incertezza tipo nella misurazione dell'efficienza con metodo diretto, e tale interessante possibilità si aggiunge alla ridotta complessità del metodo diretto già evidenziata nel presente documento. Sono reperibile sul mercato trasduttori di coppia, del tipo in linea come quello adottato nelle misurazioni presentate, che sono in classe di precisione <0.1% per coppia nominale fino a 5000 Nm, e <0.15% per coppie nominali fino a 10000 Nm, con velocità di rotazione massima fino a 5000 rpm [31].

Tabella 20- Incertezza tipo per l'efficienza ottenuta con il metodo indiretto, al variare della classe di precisione del trasduttore di coppia

Potenza meccanica in uscita [W]	Incertezza tipo ottenuta con metodo indiretto	
	Trasduttore di coppia in classe di precisione 0.2	Trasduttore di coppia in classe di precisione 0.1
777.041	0.00199	0.00199
1575.18	0.00130	0.00130
2160.41	0.00125	0.00125
2967.08	0.00140	0.00140
3838.99	0.00167	0.00167
4719.93	0.00198	0.00198

Tabella 21- Incertezza tipo per l'efficienza ottenuta con il metodo diretto, al variare della classe di precisione del trasduttore di coppia

Potenza meccanica in uscita [W]	Incertezza tipo ottenuta con metodo diretto	
	Trasduttore di coppia in classe di precisione 0.2	Trasduttore di coppia in classe di precisione 0.1
777.041	0.00734	0.00397
1575.18	0.00399	0.00220
2160.41	0.00297	0.00166
2967.08	0.00224	0.00135
3838.99	0.00173	0.00107
4719.93	0.00140	0.00090

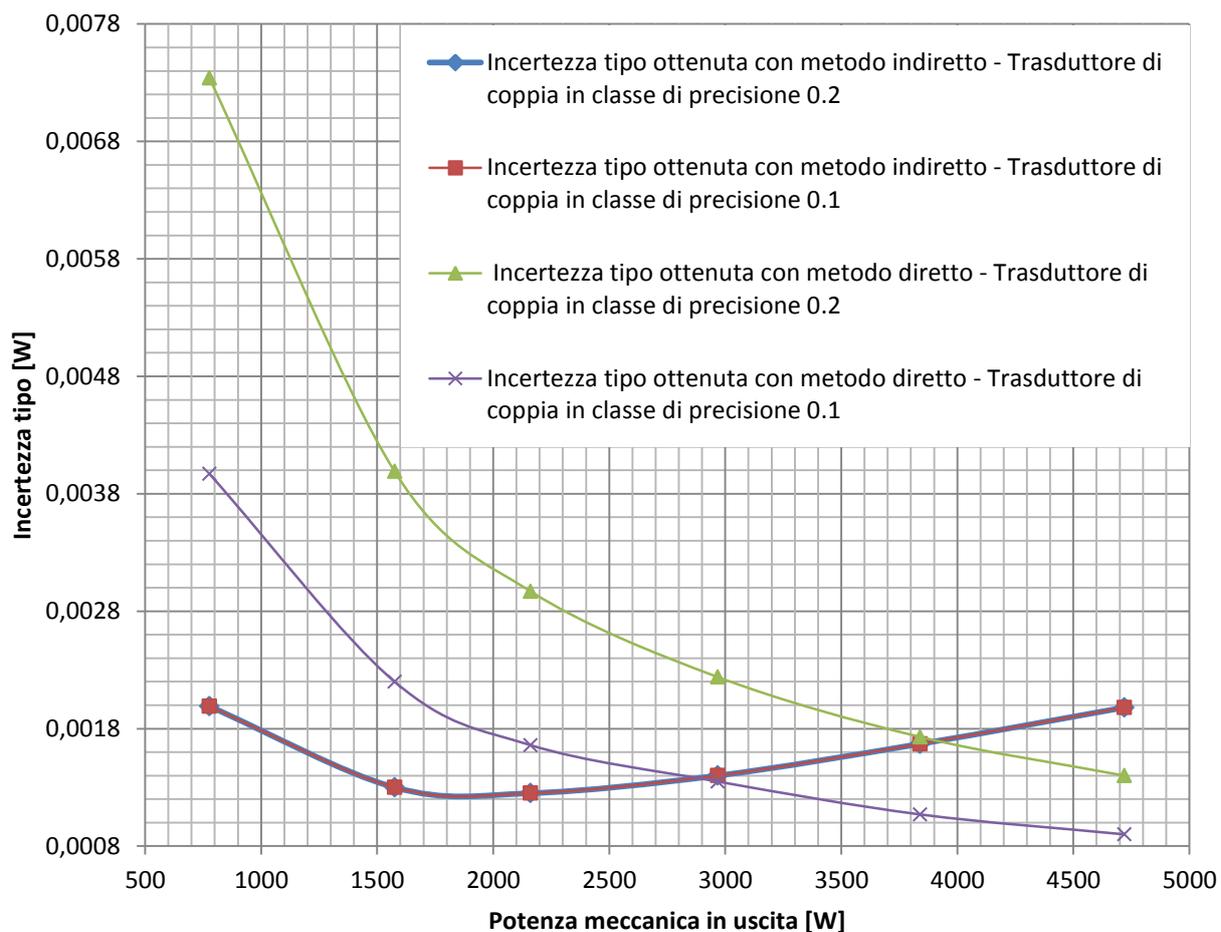


Fig. 33 – Confronto grafico tra valori delle incertezze tipo al variare della classe di precisione del trasduttore di coppia.

9 Conclusioni

Lo studio e l'analisi dettagliata della norma IEC 60034-2-1 [4], alla luce delle indicazioni della direttiva GUM [3], conducono alla individuazione di interessanti problematiche inerenti la determinazione sperimentale dell'efficienza dei motori asincroni, con aspetti differenti a seconda che si consideri il metodo diretto od il metodo indiretto.

Nella norma IEC 60034-2-1, il metodo diretto è considerato come consigliabile in quanto metodo a bassa incertezza solo per motori monofase e motori di potenza nominale minore di 1 kW; i risultati illustrati in questo documento suggeriscono che in realtà tale metodo possa essere utilizzato con successo anche per motori trifase di taglia maggiore, e che comunque una classificazione a priori inerente "bassa o media incertezza" non sia concettualmente accettabile se non supportata di una valutazione comparata delle incertezze tipo ottenute sperimentalmente.

Si aggiunga che l'implementazione del metodo diretto si può considerare come parte del procedimento necessario alla determinazione dell'efficienza con metodo indiretto, dal quale eredita le misurazioni svolte in condizioni di carico. Il metodo diretto risulta di più rapida esecuzione, e certamente affetto da minor probabilità che si verifichino errori umani nell'esecuzione delle prove, nonché nell'elaborazione dei dati sperimentali.

Si osserva inoltre come, nel metodo diretto, l'adozione di trasduttori di coppia di maggiore precisione possa dare un contributo sensibile alla riduzione dell'incertezza tipo complessiva, a differenza di quanto ottenibile con il metodo indiretto.

Per meglio valutare come si ottengano e si propagano i diversi contributi dell'incertezza, è stato condotto uno studio su un motore asincrono trifase reale, implementando le leggi della propagazione dell'incertezza secondo [3] a partire dalle prescrizioni nella misurazione delle grandezze come indicato da [5]; i risultati ottenuti hanno dimostrato che le incertezze tipo sono dello stesso ordine di grandezza.

Da un punto di vista metrologico, la norma IEC 60034-2-1 [5] dovrebbe nelle edizioni future essere rivista ed emendata, mediante l'introduzione di analisi qualitative sulle incertezze di misura ottenibili sperimentalmente ed a partire da considerazioni sulle caratteristiche della strumentazione adottata; attualmente l'analisi e la classificazione dei livelli di incertezza è qualitativa.

Questo è un limite evidente di tale norma, considerando la sua necessaria applicazione nel settore della certificazione delle prestazioni dei motori nel mercato internazionale, come prescritto dal regolamento (640/2009) [2], e l'emergere di potenziali problematiche in termini di ripetibilità e riproducibilità delle misure di efficienza sui motori asincroni polifase

Si osserva, inoltre, che i risultati presentati, in relazione al confronto tra le incertezze ottenute con il metodo indiretto e diretto sono del tutto generali, ed estendibili a motori di taglia anche superiore; ciò poiché si tratta di confronti tra elaborazioni di dati sperimentali ottenuti con la medesima strumentazione in entrambi i metodi proposti, e che la strumentazione sia elettrica che meccanica oggi disponibile sul mercato consente di ottenere le stesse incertezze fino a potenze dell'ordine del MW [31].

10 Riferimenti bibliografici

- [1] P. Waide and C. U. Brunner, "Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems", Working Paper, International Energy Agency, 2011.
- [2] COMMISSION REGULATION (EC) No 640/2009 of 22 July 2009 Implementing Directive 2005/32/EC of the European Parliament and of the Council with regard to ecodesign requirements for electric motors.
- [3] BIPM JCGM 100:2008 Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement GUM.
- [4] IEC 60034-30-1 ed1.0 Rotating electrical machines - Part 30-1: Efficiency classes of line operated AC motors (IE code) 2014-03-06.
- [5] IEC 60034-2-1 ed1.0 Rotating electrical machines - Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles) 2007-09-10. This standard is applicable until August 2017
- [6] ISO/IEC 17025 Publ. 2005 "General requirements for the competence of testing and calibration laboratories": general requirements for the competence to carry out tests and/or calibrations, including sampling. It covers testing and calibration performed using standard methods, non-standard methods, and laboratory-developed methods. It is applicable to all organizations performing tests and/or calibrations. These include, for example, first-, second- and third-party laboratories, and laboratories where testing and/or calibration forms part of inspection and product certification.
- [7] de Almeida, A.I.; Ferreira, F. J T E; Busch, J.F.; Angers, P., "Comparative analysis of IEEE 112-B and IEC 34-2 efficiency testing standards using stray load losses in low-voltage three-phase, cage induction motors," Industry Applications, IEEE Transactions on , vol.38, no.2, pp.608,614, Mar/Apr 2002.
- [8] Boglietti, A.; Cavagnino, A.; Lazzari, M.; Pastorelli, M., "Induction motor efficiency measurements in accordance to IEEE 112-B, IEC 34-2 and JEC 37 international standards," Electric Machines and Drives Conference, 2003. IEMDC'03. IEEE International , vol.3, no., pp.1599,1605 vol.3, 1-4 June 2003.

- [9] Wenping Cao; Bradley, K.J.; Zhang, H.; French, I., "Experimental Uncertainty in Estimation of the Losses and Efficiency of Induction Motors," Industry Applications Conference, 2006. 41st IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2006 IEEE , vol.1, no., pp.441,447, 8-12 Oct. 2006.
- [10] Wenping Cao, "Assessment of induction machine efficiency with comments on new standard IEC 60034-2-1," Electrical Machines, 2008. ICEM 2008. 18th International Conference on , vol., no., pp.1,6, 6-9 Sept. 2008.
- [11] Wenping Cao, "Comparison of IEEE 112 and new IEC standard 60034-2-1," Electrical Machines and Systems, 2008. ICEMS 2008. International Conference on , vol., no., pp.259,264, 17-20 Oct. 2008.
- [12] Agamloh, E.B., "A Comparison of direct and indirect measurement of induction motor efficiency," Electric Machines and Drives Conference, 2009. IEMDC '09. IEEE International , vol., no., pp.36,42, 3-6 May 2009.
- [13] He Zhang; Zanchetta, P.; Gerada, C.; Bradley, K.; Junyi Liu, "Performance evaluation of induction motor efficiency and in-service losses measurement using standard test methods," Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2011 IEEE International , vol., no., pp.913,917, 15-18 May 2011.
- [14] Andriollo, M.; De Bortoli, M.; Tortella, A., "Procedures for the additional losses assessment and analysis in high-efficiency induction machines," Clean Electrical Power (ICCEP), 2011 International Conference on , vol., no., pp.389,394, 14-16 June 2011.
- [15] Boglietti, A.; Cavagnino, A.; Vaschetto, S., "Induction motor EU standards for efficiency evaluation: The scenario after IEC 60034-2-1," IECON 2011 - 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society , vol., no., pp.2786,2791, 7-10 Nov. 2011.
- [16] Salomon, C. P., Sant'Ana, W. C., Borges da Silva, L. E., Lambert-Torres, G., Bonaldi, E. L., de Oliveira, L. E. L., Borges da Silva, J. G. Induction Motor Efficiency Evaluation Using a New Concept of Stator Resistance (2015) IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Article in Press.
- [17] Szabados, B.; Mihalcea, A., "Design and implementation of a calorimetric measurement facility for determining losses in electrical machines," Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on , vol.51, no.5, pp.902,907, Oct 2002.
- [18] Wenping Cao; Bradley, K.J.; Ferrah, A., "Development of a High-Precision Calorimeter for Measuring Power Loss in Electrical Machines," Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on , vol.58, no.3, pp.570,577, March 2009.
- [19] Boglietti, A.; Cavagnino, A.; Lazzari, M.; Pastorelli, M., "International standards for the induction motor efficiency evaluation: a critical analysis of the stray-load loss determination," Industry Applications, IEEE Transactions on , vol.40, no.5, pp.1294,1301, Sept.-Oct. 2004.
- [20] Karrer S., "Measurement and simulation of induction motor characteristics", Measurement, Volume 7, Issue 3, July–September 1989, Pages 134-140.
- [21] Bucci G., Landi C., Nuccio S, "Experimental comparison between direct and indirect measurement techniques for the characterization of Linear Induction Motors", Measurement, Volume 21, Issues 1–2, May–June 1997, Pages 47-56.
- [22] Lazarevic, Z.; Radosavljevic, R.; Osmokrovic, P., "A novel approach for temperature estimation in squirrel-cage induction motor without sensors," Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on , vol.48, no.3, pp.753,757, Jun 1999.
- [23] Agamloh, E.B., "The repeatability of IEEE standard 112B induction motor efficiency tests," Electric Machines and Drives Conference, 2009. IEMDC '09. IEEE International , vol., no., pp.1119,1126, 3-6 May 2009.
- [24] Siraki, A.G.; Pillay, P.; Angers, P., "Full Load Efficiency Estimation of Refurbished Induction Machines From No-Load Testing," Energy Conversion, IEEE Transactions on , vol.28, no.2, pp.317,326, June 2013.
- [25] Agamloh, E.B.; Nagorny, A.S., "An Overview of Efficiency and Loss Characterization of Fractional Horsepower Motors," Industrial Electronics, IEEE Transactions on , vol.60, no.8, pp.3072,3080, Aug. 2013.
- [26] Sousa Santos, V.; Felipe, P.R.V.; Gomez Sarduy, J.R.; Lemozy, N.A.; Jurado, A.; Quispe, E.C., "Procedure for Determining Induction Motor Efficiency Working Under Distorted Grid Voltages," Energy Conversion, IEEE Transactions on , vol.30, no.1, pp.331,339, March 2015.

- [27] Ferrero, A.; Salicone, S., "Measurement uncertainty," *Instrumentation & Measurement Magazine, IEEE*, vol.9, no.3, pp.44,51, June 2006.
- [28] IEC EN 60051-1 Direct acting indicating analogue electrical measuring instruments and their accessories - Part 1: Definitions and general requirements common to all parts, 1997-12-22.
- [29] IEC 60034-1 ed12.0v Rotating electrical machines - Part 1: Rating and performance 2010-02-03.
- [30] EN 60044-1 Instrument transformers - Part 1: Current transformers 1996-12-10.
- [31] Bucci, G., Ciancetta F., Fiorucci, E., Ometto A. "Uncertainty issues in direct and indirect efficiency determination for three-phase induction motors: remarks about the IEC 60034-2-1 standard" (2016) *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, in press.

11 Curricula

Curriculum Scientifico di EDOARDO FIORUCCI

Edoardo Fiorucci è nato nel 1974 a Popoli, in provincia di Pescara. Nel 2000 ha conseguito la laurea in Ingegneria Elettrica, discutendo una tesi sperimentale dal titolo: "Stazione di misura numerica per la valutazione della qualità dell'alimentazione elettrica", presso l'Università degli Studi dell'Aquila, con la votazione di 110/110 e lode. Dal 2006 al 2016 ha prestato servizio come ricercatore nel settore scientifico disciplinare ING-INF/07, presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università dell'Aquila, afferendo al Dipartimento di Ingegneria Elettrica e dell'Informazione fino al giugno 2012, e presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione e di Economia dell'Università dell'Aquila.

Nel 2016 ha preso servizio come Professore Associato, settore scientifico disciplinare ING-INF/07, ed afferisce al Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione e di Economia dell'Università dell'Aquila.

Dal 2006, in qualità di Professore Aggregato prima e Professore Associato poi, è docente del corso di Collaudi di Macchine ed Impianti Elettrici nei corsi di laurea specialistica e di laurea magistrale in Ingegneria Elettrica ed Ingegneria Elettronica.

Edoardo Fiorucci:

- dal 2003 è Member della Instrumentation and Measurement Society, IMS, dell'Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE;
- nel gennaio 2012 è stato nominato Associate Editor nel comitato editoriale della rivista IEEE IMS Transactions on Instrumentation and Measurement;
- nel 2013 e 2015 è stato menzionato dalla IEEE Instrumentation and Measurement Society tra gli "Outstanding Associate Editors".

Curriculum Scientifico di GIOVANNI BUCCI

Nel 1985 ha conseguito la laurea in Ingegneria Elettrotecnica presso l'Università degli Studi dell'Aquila con la votazione di 110/110. Dal 1985 al 1989 ha lavorato presso la Selenia Spazio dell'Aquila nel settore di ricerca e sviluppo sui sistemi automatici di misura. Nel 1989 ha preso servizio presso l'Università degli Studi dell'Aquila come Ricercatore Universitario del settore scientifico-disciplinare Misure elettriche ed elettroniche ed è stato confermato nel ruolo di Ricercatore al termine del triennio successivo. Dal 1.9.2001 ha prestato servizio come professore associato presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi dell'Aquila, nel settore scientifico disciplinare ING-INF/07 – Misure Elettriche ed Elettroniche, con regime d'impegno a tempo pieno, afferendo al Dipartimento di Ingegneria Elettrica. Dal 1.10.2006 presta servizio come professore di prima fascia presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi dell'Aquila, nel

SSD ING-INF/07 – Misure Elettriche ed Elettroniche, con regime d'impegno a tempo pieno, ed afferisce al Dipartimento di Ingegneria Elettrica e dell'Informazione.

Giovanni Bucci è referee per le riviste IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, di Measurement Science and Technology e di IEEE Sensors Journal, IEEE Transactions on Industrial Informatics, IET Generation, Transmission & Distribution, SCIENCEDOMAIN International.

Curriculum Scientifico di ANTONIO OMETTO

Ometto Antonio si è laureato in Ingegneria Elettrotecnica nell'a.a. 1985/86 presso l'Università degli Studi dell'Aquila. Nel 1986 è risultato vincitore della Borsa di Studio per il perfezionamento di ingegneri all'estero della Fondazione F. Filauro con conseguente permanenza a Sheffield (UK) nell'anno 1987, dove ha collaborato con il prof. M. McCormick dell'Università di Sheffield. Dal 1990 al 2002 è stato ricercatore del settore scientifico disciplinare ING-IND/32 presso l'Università dell'Aquila.

Nel 1993 è stato a Madison, Wisconsin (USA), dove ha collaborato con il Prof. T. Lipo dell'Università del Wisconsin. Dal 2002 è Professore Associato, prima presso il Dipartimento di Ingegneria Elettrica e dell'Informazione, attualmente presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione e di Economia dell'Università dell'Aquila, S.S.D. ING-IND/32 ed ha tenuto corsi di macchine elettriche, elettronica di potenza, attuatori elettrici, modellistica dei sistemi elettromeccanici e sistemi elettrici per la mobilità.

Curriculum Scientifico di FRANCESCO PARASILITI COLLAZZO

Francesco Parasiliti Collazzo ha conseguito la laurea con lode in Ingegneria Elettrotecnica nel 1981 presso la Facoltà di Ingegneria di Roma La Sapienza. Dal 1983 al 1992 è Ricercatore Universitario presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università dell'Aquila. Dal 1992 al 2000 è Professore Associato presso la stessa Università. Dal 1995 al 1999 è Professore a Contratto presso la De Montfort University, Leicester (UK). Dal novembre del 2000 è Professore Ordinario presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università dell'Aquila nel Settore Scientifico Disciplinare "Convertitori, Macchine ed Azionamenti Elettrici" ING/IND32.

Dal luglio 2012 è Direttore del Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione e di Economia dell'Università degli Studi dell'Aquila.

Dal febbraio 2013 al settembre 2014 è stato Vice Presidente del Consiglio di Amministrazione del Consorzio "Innovazione Automotive e Metalmeccanica".

Dal luglio 2014 è membro del Comitato di Indirizzo della Fondazione "Istituto Tecnico Superiore Nuove Tecnologie per il Made in Italy, Sistema Meccanica".

Nel settembre 2014 ha ricevuto dallo Steering Committee dell'International Conference on Electrical Machines (ICEM) lo "ICEM John Tegopoulos Distinguished Service Award" quale riconoscimento del servizio svolto in favore della comunità scientifica mondiale operante nell'ambito delle Macchine Elettriche.

Da settembre 2014 è membro del Consiglio di Amministrazione del Consorzio "Innovazione Automotive e Metalmeccanica".

Curriculum Scientifico di MARCO VILLANI

Nel 1985 ha conseguito la laurea in Ingegneria Elettrotecnica presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di L'Aquila.

Nel 1987 ha conseguito la borsa di studio di perfezionamento all'estero "Ferdinando Filauro" che gli ha consentito di effettuare uno stage presso la Technische Universität - Sektion Elektrotechnik di Dresda. È docente del corso di Costruzioni Elettromeccaniche, nell'ambito del Corso di Laurea in Ingegneria Elettrica, presso l'Università degli Studi dell'Aquila. Coordinatore di numerosi progetti di ricerca, in collaborazione

con Enti ed Industrie sia nazionali che europee. Referente, nell'ambito dei programmi Erasmus, degli accordi bilaterali con le Università di Amiens e di Kaunas.

Marco Villani ha una comprovata esperienza nel settore della progettazione delle macchine elettriche grazie anche alle collaborazioni con importanti aziende elettromeccaniche nazionali e internazionali ed alla partecipazione a numerosi progetti di ricerca finanziati dalla Comunità Europea (progetti SAVE II), dal Ministero dell'Università e della Ricerca Scientifica (progetti PRIN) e dal CNR. Ha sviluppato delle procedure di dimensionamento basate su programmi agli elementi finiti e algoritmi di ottimizzazione, che sono state ampiamente utilizzate per la progettazione di motori asincroni, motori sincroni a magneti permanenti e motori sincroni a riluttanza, per impieghi nel settore industriale, aeronautico e nel settore "automotive".