



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

**Dipartimento di Ingegneria Industriale DII**

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica

# **EFFICIENZA ENERGETICA NEI MOTORI ELETTRICI**

Relatore: Prof. Renato Gobbo

Studente: Mirco Soncin

Matricola: 1020091

Anno Accademico 2012/2013



## **Indice**

### **CAPITOLO 1: LA NECESSITA' DEL RISPARMIO ENERGETICO**

- Generalità sul risparmio energetico (pag. 5)
- Il protocollo di Kyoto (pag. 5)
- Il risparmio elettrico (pag. 6)

### **CAPITOLO 2: I MOTORI ELETTRICI AD ALTA EFFICIENZA ED INVERTER**

- I motori alta efficienza (pag. 9)
- La diffusione dei motori alta efficienza in Europa (pag. 10)
- Differenze di costo tra motori alta efficienza e bassa efficienza (pag. 11)
- Caratteristiche dei motori alta efficienza (pag. 12)
- Classificazione dei motori alta efficienza (pag. 14)
- Payback dei motori ad alta efficienza (pag. 15)
- Decreti sull'alta efficienza (pag. 20)
- Utilizzo dei regolatori di velocità (pag. 23)
- I vantaggi dell'utilizzo dell'inverter (pag. 24)
- Esempio di risparmio energetico con l'utilizzo di un inverter (pag. 25)
- Differenze di rendimento e potenza assorbita di una pompa con utilizzo di serranda o inverter (pag. 29)
- Uniformità della classificazione dei motori e normative future (pag. 31)
- Approfondimento sulle normative IEC (pag. 33)
- Introduzione dei motori alta efficienza in Italia (pag. 38)

### **CAPITOLO 3: INVERTER**

- Inverter a frequenza costante (pag. 41)
- Inverter a frequenza variabile (pag. 41)
- Il motore asincrono trifase (pag. 42)
- La regolazione della velocità e funzionamento (pag. 44)
- Funzionamento di un raddrizzatore (pag. 47)
- Funzionamento di un inverter trifase (pag. 49)

### **CAPITOLO 4: I MOTORI BRUSHLESS**

- Generalità sui motori Brushless (pag.53)

## **CAPITOLO 5: RISPARMIO ENERGETICO SUL CICLO FRIGORIFERO**

- Il ciclo frigorifero (pag. 59)
- L'utilizzo dell'inverter negli impianti frigoriferi (pag. 61)
- Accorgimenti per il funzionamento dell'impianto refrigerante (pag. 63)
- Riassunto delle differenze tra un condizionatore on-off e un condizionatore con inverter (pag. 66)
- Rumorosità degli impianti frigoriferi (pag. 69)

## **Introduzione**

L'argomento affrontato nella seguente tesi ha una forte rilevanza sia nei nostri giorni sia nel futuro perché riguarda il risparmio energetico e più precisamente il l'efficienza nei motori elettrici.

L'elevato consumo delle macchine elettriche, il quale copre il 74% dei consumi elettrici nazionali, ha portato i costruttori di tali macchine e i governi ad attuare piani e normative che possano regolarne i consumi, portando così un minor consumo nelle centrali elettriche e in seguito una diminuzione della produzione di CO<sub>2</sub> con l'obbiettivo di rispettare i patti stabiliti nel protocollo di Kyoto che prevede una diminuzione di gas serra del 5,2% entro il 2012.

Nella seguente tesi verranno affrontate le differenze economiche e costruttive tra motori elettrici a basso rendimento e motori ad alto rendimento con una conseguente valutazione sulla convenienza o meno dell'acquisto, della sostituzione o della riparazione di un motore obsoleto con un motore ad alta efficienza.

Visto l'elevato costo di un motore di nuova generazione, verrà affrontato l'argomento del "payback" cioè il tempo di recupero della maggiorazione di costo di tali motori considerando fattori come le ore di utilizzo, il fattore di carico ed eventuali riavvolgimenti.

Un altro elemento fondamentale da associare ai motori ad alta efficienza per incrementare il risparmio energetico, a livelli anche del 60%, sono i convertitori di frequenza (detti comunemente inverter). Essi vengono utilizzati per variare la velocità di un motore asincrono e sono estremamente utili quando non è necessario questi funzionino sempre a pieno regime.

Per comprendere meglio l'efficienza di un inverter verranno fatti alcuni esempi pratici nell'applicazione di questi su pompe, ventilatori e compressori di frigoriferi e ci sarà una breve discussione anche sui vantaggi dell'utilizzo di un motore Brushless rispetto ai motori in corrente continua.



## **CAPITOLO 1: LA NECESSITA' DEL RISPARMIO ENERGETICO**

### **- Generalità sul risparmio energetico**

Al giorno d'oggi la necessità di risparmiare energia è un argomento all'ordine del giorno. Per risparmio energetico, in senso stretto, si intende il risparmio di fonti energetiche come petrolio, metano, combustibili solidi e materiali fissili.

Sotto il nome di risparmio energetico si annoverano varie tecniche atte a ridurre i consumi dell'energia necessaria allo svolgimento delle diverse attività umane. Il risparmio può essere ottenuto sia modificando i processi energetici in modo che ci siano meno sprechi, sia con tecnologie in grado di trasformare l'energia da una forma all'altra in modo più efficiente.

La valutazione delle opportunità di risparmio energetico scaturisce solitamente da una diagnosi energetica che evidenzia i consumi e va ad individuare le più rilevanti possibilità di conseguire interventi di recupero di efficienza energetica. Le diagnosi dovrebbero per quanto possibile essere eseguite secondo le indicazioni della norma UNI CEI/TR 11428:2011 cioè la norma che regola i requisiti e la metodologia comune per le diagnosi energetiche nonché la documentazione da produrre e si applica a tutti i sistemi energetici, a tutti i vettori di energia e a tutti gli usi dell'energia.

Uno degli esempi più comuni di risparmio è dato dalla sostituzione delle lampadine ad incandescenza con quelle fluorescenti che emettono una quantità di energia luminosa diverse volte superiore alle prime a parità di energia, oppure con lampade a LED le quali consumano l'80 % in meno di una lampada ad incandescenza.

Anche nel riscaldamento degli edifici ci sono accorgimenti più o meno semplici per risparmiare energia, come l'uso delle valvole termostatiche, l'uso di cronotermostati ed altri più impegnativi, come la sostituzione degli infissi obsoleti, delle caldaie vecchie con caldaie a condensazione, l'isolamento termico delle pareti.

Un risparmio energetico si può avere anche a livello di produzione energia elettrica utilizzando sistemi di cogenerazione atti a migliorare i rendimenti dei vari processi, che consistono in tecnologie atte ad ottenere energia elettrica e calore; oppure si sfrutta l'energia dissipata nel moto degli esseri umani o delle automobili, come è già stato fatto in Olanda, ad esempio con pavimenti sensibili alla pressione, posti nelle scale dei metrò per produrre energia elettrica.

Grande importanza nel tema del risparmio dell'energia lo hanno le società di servizi energetici dette ESCO ( Energy Service Companies ) cioè realtà imprenditoriali che si occupano dell'attuazione di misure di efficienza energetica ossia di interventi tesi al raggiungimento di una riduzione dei consumi negli usi finali dell'energia da parte degli utenti.

### **- Il protocollo di Kyoto**

Una delle tappe più significative a livello mondiale per incentivare il risparmio energetico è il protocollo di Kyoto.

Esso è un trattato internazionale in materia di ambiente sottoscritto nella città giapponese l'11 dicembre 1997 da più di 160 paesi in occasione della Conferenza COP3 della Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici (UNFCCC) ed il riscaldamento globale.

Il trattato prevede l'obbligo, nel periodo 2008-2012, in capo ai paesi industrializzati di operare una riduzione delle emissioni di elementi inquinanti come biossido di carbonio, metano, ossido di azoto, idrofluorocarburi e esafluoruro di zolfo in una misura non inferiore al 5,2 % rispetto alle emissioni registrate nel 1990.

Perché il trattato potesse entrare in vigore si richiedeva che fosse rettificato da non meno di 55 nazioni firmatarie, e che le nazioni che lo avessero rettificato producessero almeno il 55 % delle emissioni inquinanti; questa ultima condizione è stata raggiunta solo nel novembre del 2004, quando la Russia ha perfezionato la sua adesione.

Premesso che l'atmosfera contiene 3 milioni di megatonnellate di CO<sub>2</sub>, il protocollo prevede che i paesi industrializzati riducano del 5,2 % le proprie emissioni di quel gas. Nel mondo vengono immessi 6000 megatonnellate di CO<sub>2</sub> di cui 3000 dai paesi industrializzati e 3000 da quelli in via di sviluppo. Per cui con Kyoto dovrebbe immetterne 5850 anziché 6000, sul totale di 3 milioni: dato l'elevatissimo costo della riduzione è facile capire perché il protocollo non abbia grandi adesioni.

I paesi che hanno aderito a questo protocollo, nel dicembre del 2006, erano 169. I paesi non aderenti sono gli Stati Uniti, responsabili del 36,1 % del totale delle emissioni. Alcuni stati e grandi municipalità, come Los Angeles e Chicago, stanno studiando la possibilità di emettere provvedimenti che permettano a livello locale di applicare il trattato, il che comunque non sarebbe un successo indifferente: basti pensare che gli stati del New England, da soli, producono tanto biossido di carbonio quanto un grande paese industrializzato europeo come la Germania.

Anche l'Australia ha annunciato che non intende aderire all'accordo, per non danneggiare il proprio sistema industriale. Non hanno aderito neanche Crozia, Kazakistan e Monaco.

Il 9 marzo 2007, i 27 Stati membri dell'Unione Europea hanno siglato un accordo che sanciva il loro impegno alla riduzione delle emissioni di gas serra di un 20 % entro il 2020, rispetto ai valori del 1990.

### **- Il risparmio elettrico**

Dal punto di vista dei consumi elettrici, l'Italia ha dovuto far fronte ad un aumento di domanda di energia elettrica dovendo così importare quote significative sia di combustibili fossili dalle aree di estrazione sia acquistando energia elettrica dai nostri vicini d'oltralpe, evidenziando la sua vulnerabilità a causa delle perduranti oscillazioni del prezzo del greggio e delle possibili tensioni politiche nei paesi produttori con le conseguenti difficoltà di approvvigionamento.

Basti pensare che negli ultimi anni i consumi elettrici sono ulteriormente aumentati, anche e soprattutto d'estate, con il rischio che, in situazioni particolari o di picco, la domanda superi l'offerta e si rendano inevitabili distacchi programmati del carico. Inoltre la forte dipendenza della produzione di energia elettrica dai combustibili fossili si riflette negativamente sia sulle emissioni inquinanti, sia sul costo della bolletta: infatti l'Italia è il paese europeo con il prezzo più alto dell'energia elettrica per le aziende industriali, le quali si trovano così a dover competere nel mercato globale con le concorrenti estere. È dunque imperativo, al fine di migliorare la propria competitività, che le imprese cerchino di contenere i costi della bolletta elettrica, riducendo i consumi.

Numerose sono state le iniziative intraprese dagli stati membri, non solo sotto forma di campagne di comunicazione e informazione ma soprattutto meccanismi di incentivi o obbligatorietà, sia a livello delle singole nazioni sia a livello europeo.

In Italia, già da qualche anno sono stati istituiti i meccanismi definiti dall'Autorità dell'Energia Elettrica e Gas per i certificati verdi (riferiti alla produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili) e bianchi (riferiti agli interventi di efficienza energetica in termini di riduzione dei consumi degli apparati e impianti esistenti). Inoltre, la legge Finanziaria del 2007 ha stabilito incentivi statali e agevolazioni fiscali per l'efficienza energetica in più ambiti. Sono anche state avviate numerose e importanti iniziative a livello regionale o provinciale che tendono ad agevolare e rendere ancor più concreti gli sforzi tecnico-economici per il raggiungimento degli ambiziosi obiettivi concordati con l'Unione Europea.

Le diverse iniziative mirano a ridurre l'impatto ambientale pur mantenendo invariati gli standard di vita, anzi rendendoli accessibili ad un numero maggiore di persone.

Nel 2006 Confindustria ha istituito una specie di task force con l'obiettivo di analizzare i potenziali risparmi ottenibili nelle varie aree di consumo ed evidenziare le migliori tecnologie



disponibili per implementare piani di efficienza energetica, senza impattare sulla produttività industriale e senza introdurre oneri aggiuntivi per le imprese.

La situazione energetica italiana è infatti da anni tra le più critiche a livello europeo. La forte indipendenza dell'Italia dalle risorse straniere, in termini sia di energie primarie sia di energia elettrica, è tra le principali cause degli elevati prezzi dell'energia per i consumatori italiani, che si trovano a subire costanti incrementi di prezzo su valori già nettamente superiori a quelli delle corrispondenti realtà negli altri Paesi europei.

Il Ministero dello Sviluppo Economico ha presentato alla Comunità Europea un "Piano nazionale per l'efficienza energetica" nel quale, tra le iniziative nazionali avviate per promuovere l'efficienza energetica, si evidenzia l'incentivo istituito per migliorare l'efficienza dei motori elettrici.



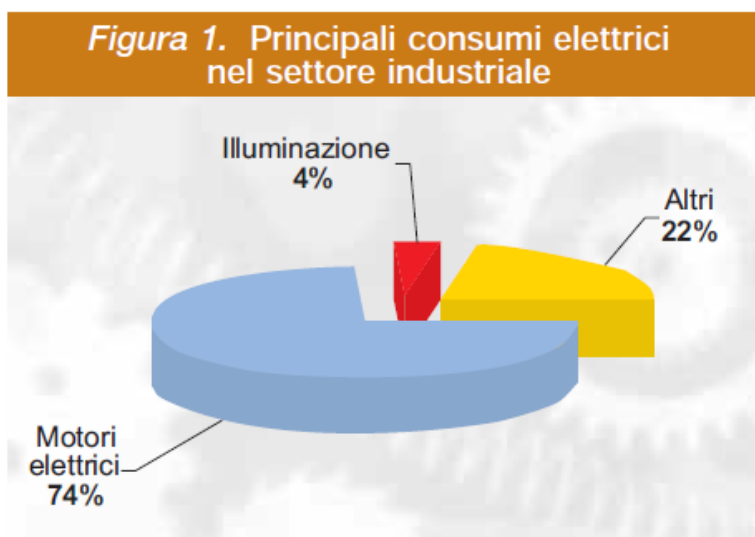
## **CAPITOLO 2: I MOTORI ELETTRICI AD ALTA EFFICIENZA ED INVERTER**

### **- I motori alta efficienza**

In particolare, nell'industria i motori elettrici assorbono il 74 % dell'energia elettrica totale attribuita al settore. Migliorando le caratteristiche tecnologiche dei motori stessi e le modalità secondo cui ne viene gestito il funzionamento si possono ottenere molteplici vantaggi, primo tra tutti i notevoli risparmi economici sulla bolletta dell'utente.

Le attuali tecnologie permettono di raggiungere elevati livelli di efficienza energetica principalmente attraverso due tipi di interventi, tra loro integrabili, potendo in tal modo accumularne i vantaggi: utilizzare nuovi motori ad alta efficienza e controllarne la velocità secondo le reali esigenze di ogni applicazione, evitando il funzionamento alla massima potenza quando non è richiesto.

Per ciò che riguarda i motori è importante notare che, grazie alle moderne tecnologie dei materiali e una più attenta progettazione in grado di ottimizzare le parti attive, è oggi possibile costruire motori di efficienza più elevata che in passato. In Europa, dove non è ancora stata promulgata una legge che definisca degli standard minimi accettabili, esiste un accordo volontario, detto CEMEP, tra i più importanti produttori di motori in base al quale è stata definita una classificazione in tre diverse classi di efficienza.



I motori elettrici ad alta efficienza sono poco conosciuti. O meglio, vengono citati nelle leggi nazionali, fanno parte di programmi di risparmio energetico dell'Unione Europea, alcune volte se ne parla nei convegni, ma i diretti interessati, gli industriali, spesso ne ignorano l'esistenza. I motori elettrici risultano essere dei componenti molto affidabili e non danno particolari problemi ed è per questo che spesso non vengono seguiti i loro sviluppi tecnologici.

Eppure, nel settore industriale, attraverso l'utilizzo di motori, viene speso quasi il 74 % della energia elettrica. Basta pensare che in Italia i consumi elettrici relativi al settore industriale nell'anno 1995 sono stati di circa 124,8 TWh di cui 92,5 TWh erano dovuti all'utilizzo di motori elettrici. Le stime al 2010 dei valori percentuali rimangono pressoché invariate.

Nonostante questo, molto poco viene fatto per ridurre i loro consumi, pur sapendo che ci potrebbero essere potenziali risparmi che ammontano a diversi punti percentuali. Quanto detto ha ancora più valore se si pensa che al momento dell'acquisto di un motore ci si preoccupa quasi esclusivamente del suo prezzo. Si dimentica però che un motore ha un costo di esercizio molto più elevato di quello di acquisto. Per esempio un motore elettrico da 15 kW, ha un costo di circa 520 euro, ed un costo di

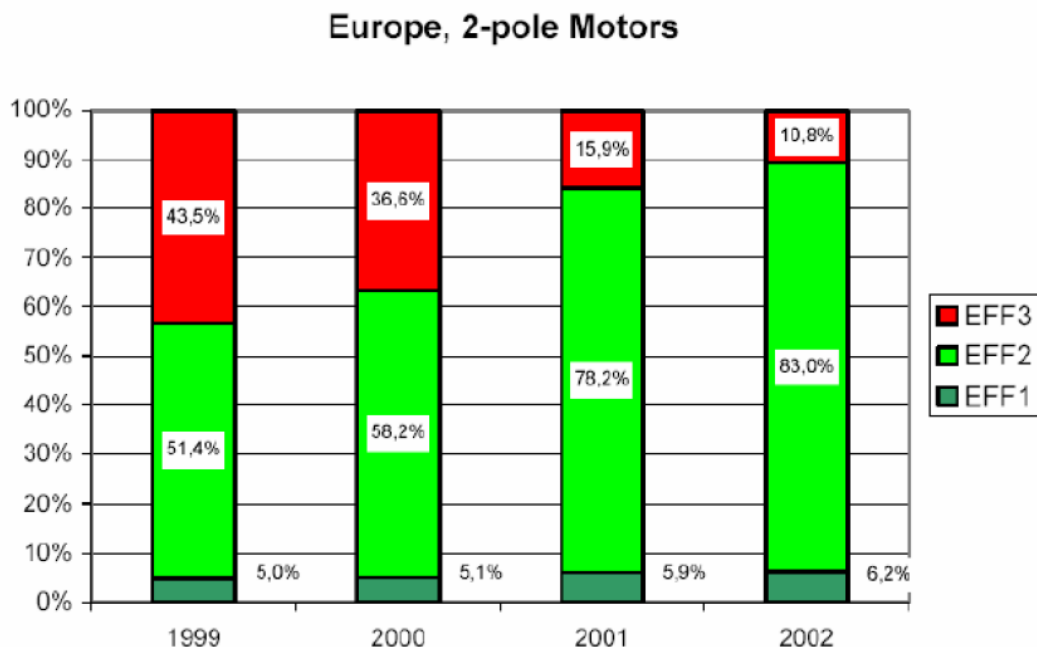
esercizio in dieci anni, considerando 3500 ore di funzionamento annue e un costo dell'energia elettrica di 7 c€/kWh, di circa 32000 euro cioè quasi 60 volte il costo iniziale. Nonostante questo, spesso le imprese continuano ad acquistare motori scadenti per risparmiare sul costo d'acquisto, senza immaginare che un banale sovrapprezzo per l'acquisto di un motore più efficiente potrebbe essere recuperato in poco tempo.

### - La diffusione dei motori ad alta efficienza in Europa

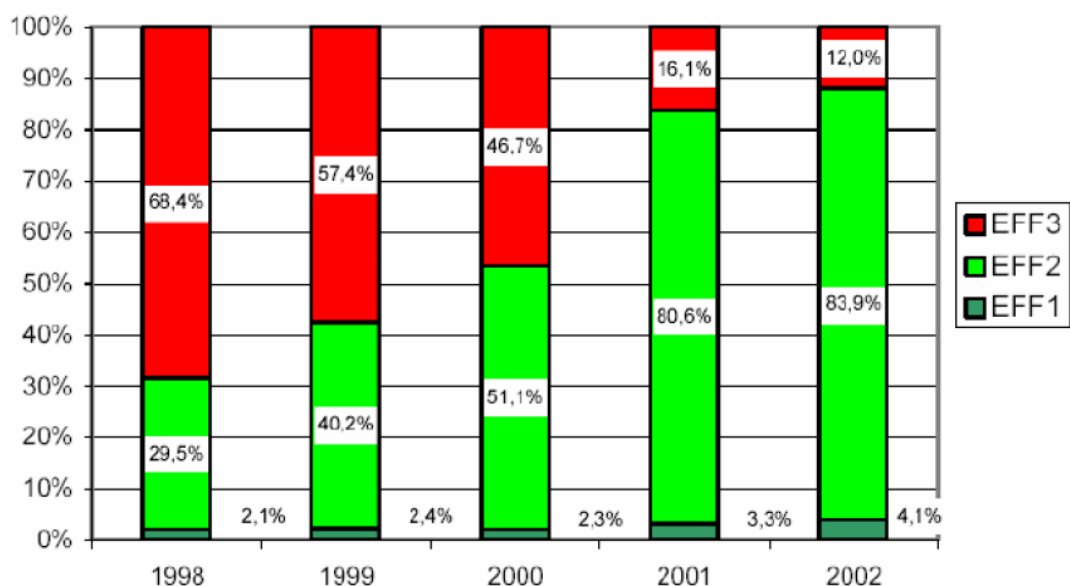
I motori ad alta efficienza, soprattutto nella fine degli anni novanta, hanno avuto una grossa difficoltà ad essere introdotti nel mercato. Uno dei motivi principali di tutto ciò è il fatto che il loro costo è superiore a quello di un semplice motore standard e questo comporta, a causa delle scarse conoscenze sulle loro caratteristiche e alla possibilità di recuperare l'investimento fatto attraverso il risparmio energetico, ad una insufficiente valutazione sulla necessità di investire denaro per acquistare questi motori e a cercare di risparmiare denaro il più possibile. Un altro motivo della loro scarsa diffusione fu quello che lo stato non dava nessun tipo di incentivo sulla loro diffusione ma da quando sono state create delle norme per incentivare il loro acquisto attraverso aiuti economici, ecco che questi motori hanno avuto una più larga diffusione.

In Europa, nel 1998, i motori a bassa efficienza EFF3 rappresentavano il 43,5 % per i motori a 2 poli e il 68,4 % per quelli a 4 poli. Oggi possiamo considerarli quasi completamente scomparsi nelle nuove forniture.

I motori ad alta efficienza EFF1 invece rappresentavano il 5 % per i motori a 2 poli e il 2,1 % per i motori a 4 poli. A distanza di 4 anni si è notato un miglioramento modesto proprio per i motivi sopracitati.



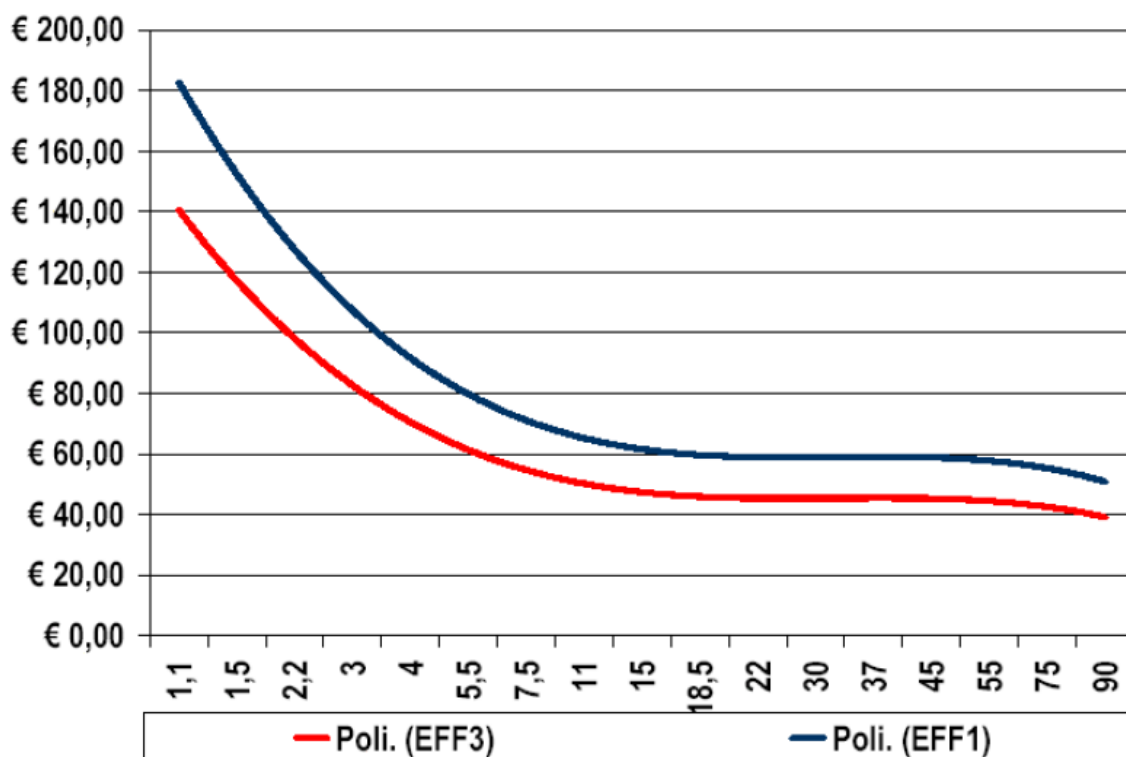
## Europe, 4-pole Motors



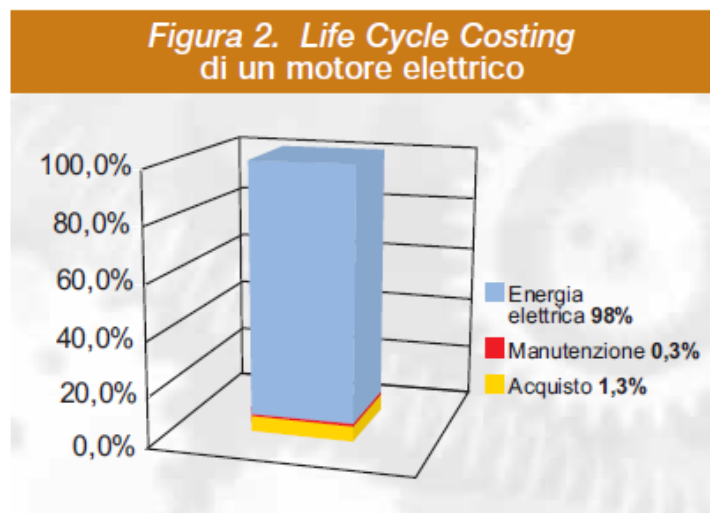
### - Differenze di costo tra motori alta efficienza e bassa efficienza

Il costo di un motore ad alta efficienza EFF1 risulta essere superiore del 20 – 30 % rispetto ad un motore equivalente EFF2. Per quanto riguarda, invece, il costo di un motore EFF2 è tipicamente solo del 2 – 3 % superiore a quello di un equivalente EFF3.

Attraverso il seguente grafico andiamo a rappresentare le differenze di costo di un motore ad alta efficienza con un motore a bassa efficienza per ogni kW di potenza.



Un'altra motivazione per andare ad acquistare un motore ad alta efficienza EFF1 è data dal fatto che i maggiori costi in un ciclo di vita del motore sono dovuti dai consumi elettrici. Una recente analisi dell'ENEA dimostra che, considerando un motore da 15 kW con un normale ciclo di carico giornaliero, un vita media di 10 anni e un costo dell'energia pari a 0,10 €/kWh si ottiene un costo di acquisto pari all'1,3 % del costo di vita complessivo. I costi dell'energia elettrica consumata arrivano al 98,4 % del totale e uno 0,3 % è rappresentato dai costi di manutenzione. Da questi dati è comprensibile capire che risparmi può portare un motore ad alta efficienza. Il seguente grafico riassume quanto appena detto.



### - Caratteristiche dei motori alta efficienza

La tecnologia, negli ultimi anni, ha fatto grandi passi e sono stati creati dei particolari motori per diminuire i consumi elettrici. Questi motori vengono chiamati motori ad alta efficienza. Essi hanno la particolarità di avere minori perdite rispetto a motori tradizionali.

Le perdite possono essere di diversa natura:

- Perdite meccaniche, per attrito (nei cuscinetti e nelle spazzole) e per ventilazione;
- Perdite nel ferro a vuoto (proporzionali al quadrato della tensione), costituite da perdite per isteresi consistenti nell'energia dispersa nei cambi di direzione del flusso e perdite per correnti parassite causate dalle correnti circolanti entro il nucleo, indotte dai cambiamenti di flusso;
- Perdite per effetto Joule (proporzionali al quadrato della corrente), negli avvolgimenti di statore e di rotore.

Nei motori ad alta efficienza queste perdite sono state ridotte intervenendo sui materiali o modificando alcuni elementi costruttivi quali:

- Il nucleo, realizzato con lamierini a basse perdite perché più sottili e minore traferro che diminuiscono le perdite a vuoto;
- Aumentando la sezione dei conduttori dello statore e del rotore per ridurre le perdite per effetto Joule;
- Praticando un attenta scelta del numero delle cave e della geometria delle stesse;

Tutte queste modifiche comportano, inoltre, una minore produzione di calore e di conseguenza l'impiego di ventole di raffreddamento più piccole e quindi minori perdite meccaniche.

Si sono ottenuti così motori che a parità di potenza hanno un rendimento migliore di quello standard ed una curva del rendimento più piatta, tale cioè da garantire, anche in caso di spostamenti del carico, un rendimento sempre vicino a quello ottimale.

Questi motori risultano avere un miglior design, la differenza principale risiede nell'utilizzo di più materiale e anche di migliore qualità.

L'unico aspetto negativo è quello che questi motori risultano essere di dimensioni più elevate di quelle di un motore di tipo standard e questo può provocare, in alcuni casi, delle difficoltà di installazione se lo spazio dove vengono posti risulta essere limitato.

Nel grafico sottostante andiamo a riassumere i vantaggi dell'utilizzo di un motore ad alta efficienza:

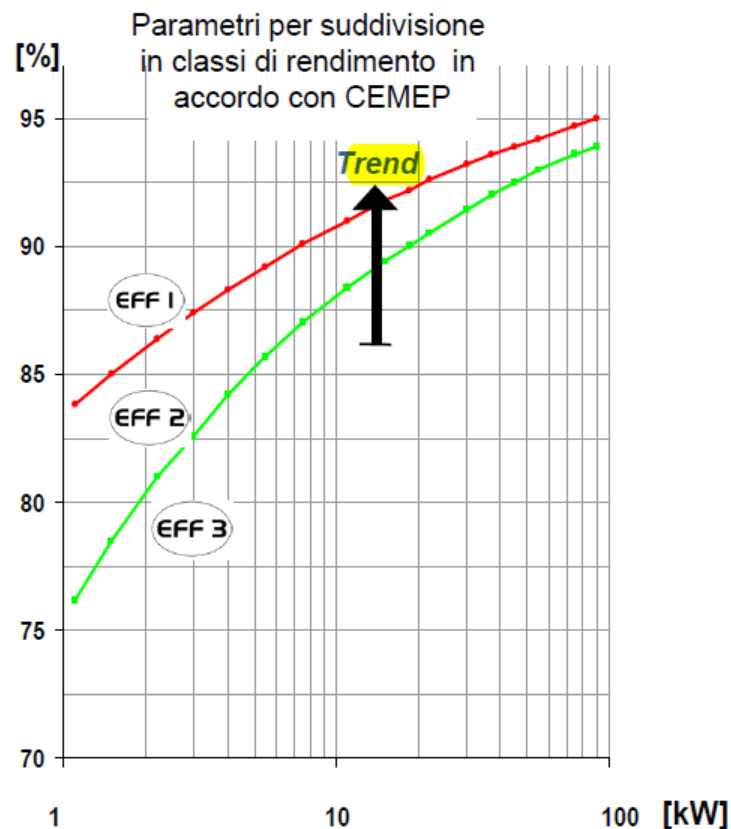


## - Classificazione dei motori alta efficienza

Ultimamente il CEMEP ( Comitato Europeo Costruttori Macchine Rotanti e Elettronica di Potenza) e la Commissione Europea hanno raggiunto un accordo volontario sulla costruzione di motori elettrici. Sono state così stabilite tre classi di efficienza EFF1, EFF2 e EFF3 (di cui la EFF1 è la classe migliore e la EFF3 è la classe peggiore). Per ogni classe sono stati definiti i rendimenti minimi che questi motori devono avere. I costruttori che hanno aderito all'accordo si sono impegnati a rispettare questi valori minimi.

Le norme CEMEP prescrivono classi di rendimento per motori che vanno da 1,1 kW a 90 kW di potenza. I livelli di rendimento si dividono in tre classi così definite da due curve caratteristiche:

- EFF1: motori ad alto livello di rendimento
- EFF2: motori a livello di rendimento standard
- EFF3: motori a basso livello di rendimento



Le tre classi di efficienza individuate, in base alla normativa stabilita dal CEMEP, devono presentare questi livelli minimi di rendimento rispetto ai motori a bassa efficienza.



**TIPO 2 POLI, COME DEFINITO DALL'ACCORDO VOLONTARIO**

kW	eff3 - motors $\eta_N$	eff2 - motors $\eta_N$	eff1 - motors $\eta_N$
1,1	< 76,2	$\geq$ 76,2	$\geq$ 82,8
1,5	< 78,5	$\geq$ 78,5	$\geq$ 84,1
2,2	< 81,0	$\geq$ 81,0	$\geq$ 85,6
3	< 82,6	$\geq$ 82,6	$\geq$ 86,7
4	< 84,2	$\geq$ 84,2	$\geq$ 87,6
5,5	< 85,7	$\geq$ 85,7	$\geq$ 88,6
7,5	< 87,0	$\geq$ 87,0	$\geq$ 89,5
11	< 88,4	$\geq$ 88,4	$\geq$ 90,5
15	< 89,4	$\geq$ 89,4	$\geq$ 91,3
18,5	< 90,0	$\geq$ 90,0	$\geq$ 91,8
22	< 90,5	$\geq$ 90,5	$\geq$ 92,2
30	< 91,4	$\geq$ 91,4	$\geq$ 92,9
37	< 92,0	$\geq$ 92,0	$\geq$ 93,3
45	< 92,5	$\geq$ 92,5	$\geq$ 93,7
55	< 93,0	$\geq$ 93,0	$\geq$ 94,0
75	< 93,6	$\geq$ 93,6	$\geq$ 94,6
90	< 93,9	$\geq$ 93,9	$\geq$ 95,0

$\eta_N$  in %  
 $\eta_N$  secondo norma IEC 34, metodo della somma delle perdite.

**TIPO 4 POLI, COME DEFINITO DALL'ACCORDO VOLONTARIO**

kW	eff3 - motors $\eta_N$	eff2 - motors $\eta_N$	eff1 - motors $\eta_N$
1,1	< 76,2	$\geq$ 76,2	$\geq$ 83,8
1,5	< 78,5	$\geq$ 78,5	$\geq$ 85,0
2,2	< 81,0	$\geq$ 81,0	$\geq$ 86,4
3	< 82,6	$\geq$ 82,6	$\geq$ 87,4
4	< 84,2	$\geq$ 84,2	$\geq$ 88,3
5,5	< 85,7	$\geq$ 85,7	$\geq$ 89,2
7,5	< 87,0	$\geq$ 87,0	$\geq$ 90,1
11	< 88,4	$\geq$ 88,4	$\geq$ 91,0
15	< 89,4	$\geq$ 89,4	$\geq$ 91,8
18,5	< 90,0	$\geq$ 90,0	$\geq$ 92,2
22	< 90,5	$\geq$ 90,5	$\geq$ 92,6
30	< 91,4	$\geq$ 91,4	$\geq$ 93,2
37	< 92,0	$\geq$ 92,0	$\geq$ 93,6
45	< 92,5	$\geq$ 92,5	$\geq$ 93,9
55	< 93,0	$\geq$ 93,0	$\geq$ 94,2
75	< 93,6	$\geq$ 93,6	$\geq$ 94,7
90	< 93,9	$\geq$ 93,9	$\geq$ 95,0

$\eta_N$  in %  
 $\eta_N$  secondo norma IEC 34, metodo della somma delle perdite.

**- Payback dei motori ad alta efficienza**

Supponiamo di voler ottimizzare al meglio il bilancio energetico di un'azienda e di essere a conoscenza dei motori elettrici ad alta efficienza. Come ci si deve comportare?

La prima cosa da fare è un inventario di tutti i motori presenti nello stabilimento, il quale non dovrà limitarsi solo ad un semplice elenco di motori ma dovrà contenere dati tecnici importanti quali la potenza, anno di installazione, rendimento, ore di funzionamento annue, fattore di carico, ecc.

Tutti questi dati ci permettono di capire l'energia elettrica consumata dal motore nell'arco dell'anno e l'incidenza percentuale sui consumi dell'azienda. Lo scopo finale è quello di verificare se economicamente conviene utilizzare i motori ad alta efficienza. Per ogni motore possiamo simulare due alternative:

1. Se il motore si rompe cioè abbiamo una rottura degli avvolgimenti statorici o rotorici possiamo decidere di riavvolgere il motore o sostituirlo con uno nuovo ad alta efficienza. Prima di tutto andiamo a calcolare il payback cioè il tempo di ritorno del denaro speso in più per acquistare il motore attraverso il risparmio energetico. Se il payback è basso allora risulta conveniente andare ad acquistare il motore elettrico ad alta efficienza, se il payback risulta essere alto allora risulta essere più conveniente farlo riavvolgere. È necessario tenere conto però che un motore elettrico riavvolto tende a diminuire il suo rendimento da 0,5 % nel migliore dei casi ma può diminuire anche del 4 % nel peggiore dei casi.
2. Se vogliamo acquistare un motore nuovo rispetto ad un motore standard è necessario sempre vedere il payback in modo da capire in quanto tempo la differenza di costo dei due motori mi ritorna indietro attraverso il risparmio energetico.

L'elemento fondamentale per calcolare il payback è il tempo di utilizzo del motore. Maggiori sono le ore di funzionamento annue del motore, minore sarà il tempo di recupero dell'investimento ma se le ore di funzionamento sono molto poche allora risulta essere non conveniente acquistare motori ad alta efficienza perché i tempi di recupero diventerebbero molto lunghi e potrebbero richiedere molti anni soprattutto per motori molto potenti. Oltre a questo, influisce anche il costo dell'energia elettrica, cioè maggiore è il suo valore maggiore sarà la convenienza ad acquistare un motore ad alta efficienza anche con basse ore di utilizzo annue.

Ovviamente risulta conveniente sostituire subito un motore con uno ad alta efficienza se esso è di piccola taglia. Risulta invece più delicato l'acquisto di un motore ad alta efficienza nel caso si voglia acquistarne uno di grossa taglia.

La formula per il calcolo del payback risulta essere la seguente:

### CALCOLO DEL PAYBACK

$$Payback = \frac{(C_{hem} - C_{riav})}{\left( P \cdot C_c \cdot h \cdot c \cdot \left( \frac{1}{eff_{std} - eff_{riav}} - \frac{1}{eff_{hem}} \right) \right)}$$

Payback (anni)

$C_{hem}$ : costo del motore ad alta efficienza (€),

$C_{riav}$ : costo del riavvolgimento (€)

P: potenza di targa dal motore (kW),

$C_c$ : coefficiente di carico del motore, cioè la percentuale rispetto al pieno carico alla quale lavora il motore,

h: numero di ore annue di funzionamento del motore (h/a),

$eff_{std}$ : rendimento di un motore standard al punto di lavoro,

$eff_{riav}$ : perdita di rendimento dovuta al riavvolgimento,

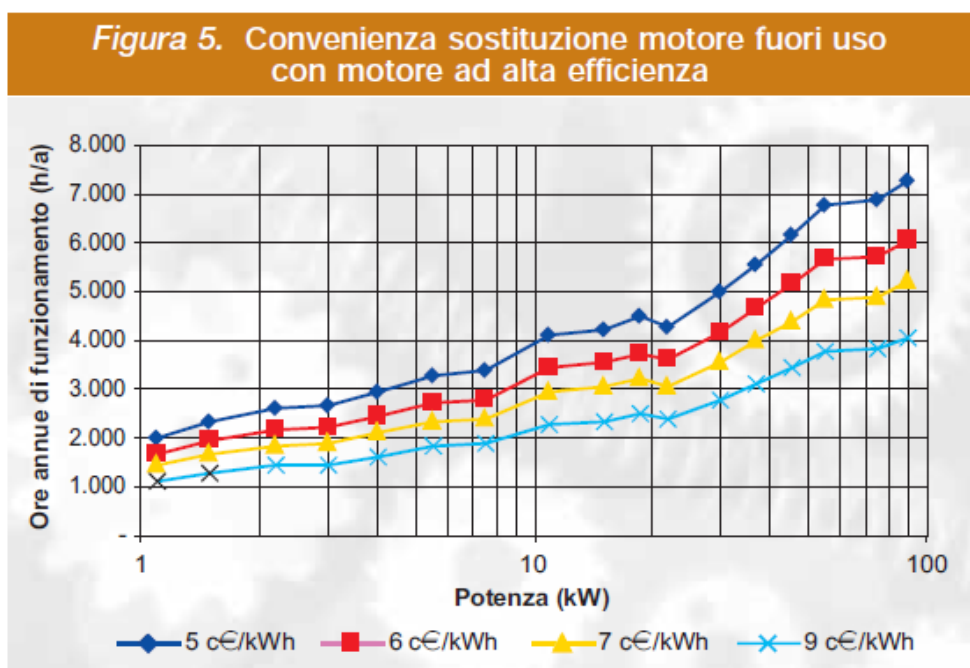
$eff_{hem}$ : rendimento del motore ad alta efficienza,

c: costo medio del kWh (c€/kWh).

Il grafico sottostante mostra il numero minimo di ore annue richieste per poter affermare che è meglio in caso di rottura sostituire il motore con uno ad alta efficienza piuttosto che riavvolgerlo.

Il grafico è stato realizzato utilizzando i seguenti valori:

- un tempo di ritorno di 3 anni
- un coefficiente di carico di 0,75
- un'efficienza del motore esistente pari alla massima di classe eff3 ridotta del 2 % per potenze comprese tra 1,1 kW e 7,5 kW; ridotta del 1,5 % per potenze comprese tra 11 kW e 22 kW; ridotta del 1 % per potenze maggiori del 22 %;
- un'efficienza del motore ad alto rendimento pari a quella minima della classe eff1
- una riduzione dell'efficienza del 1 % del motore in caso di riavvolgimento



Sull'asse orizzontale individuiamo la potenza del motore in questione. Ci muoviamo in verticale fino ad incontrare la curva corrispondente al nostro costo dell'energia elettrica. Ora tracciamo una retta orizzontale e andiamo a leggere il numero minimo di ore che il motore deve lavorare in un anno perché sia conveniente effettuare l'acquisto di un motore ad efficienza eff1 anziché effettuare il riavvolgimento.

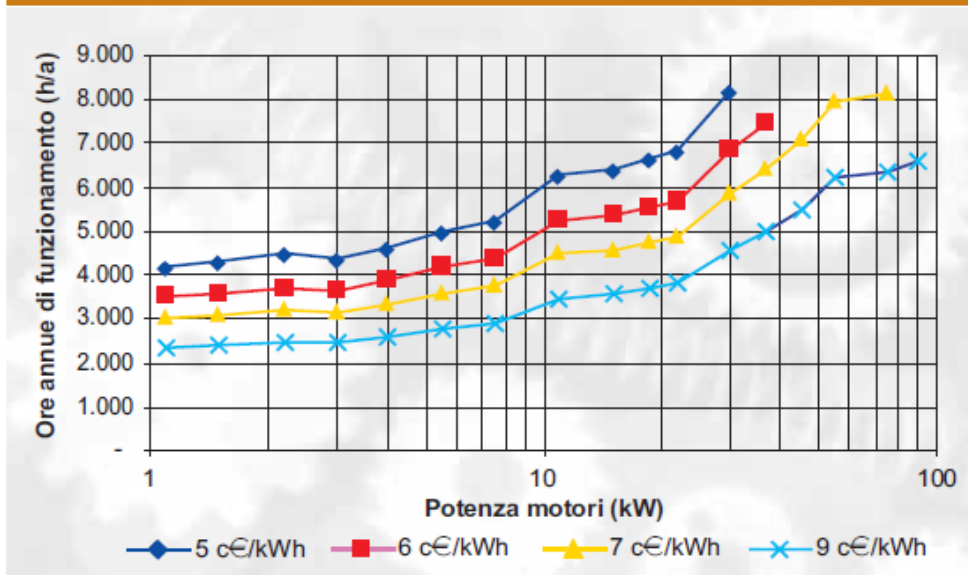
Per esempio per un motore da 60 kW e per un costo dell'energia di 7 c€/kWh sono necessarie almeno 5000 ore di funzionamento annuo perché risulti conveniente l'acquisto di un motore ad alta efficienza rispetto all'effettuazione del riavvolgimento.

Per motori estremamente piccoli possiamo vedere che il funzionamento annuo è compreso tra le 1000 e 2000 ore e quindi, dato il costo di un motore ad alta efficienza è comunque vantaggioso acquistarne uno nuovo rispetto a farlo riavvolgere.

Come si potrà notare dal grafico, per motori piccoli ( sotto gli 11 kW ) sono sufficienti poche migliaia di ore per rendere conveniente la sostituzione. Per i motori più grandi è necessario un maggior numero di ore. Anche il costo dell'energia ha una buona parte di influenza. Il grafico mostra che più questo è basso e più aumenta il numero di ore di lavoro minimo per la convenienza.

Nel caso voglia valutare la convenienza di sostituire un motore funzionante con un motore ad alta efficienza potrà usare il seguente grafico.

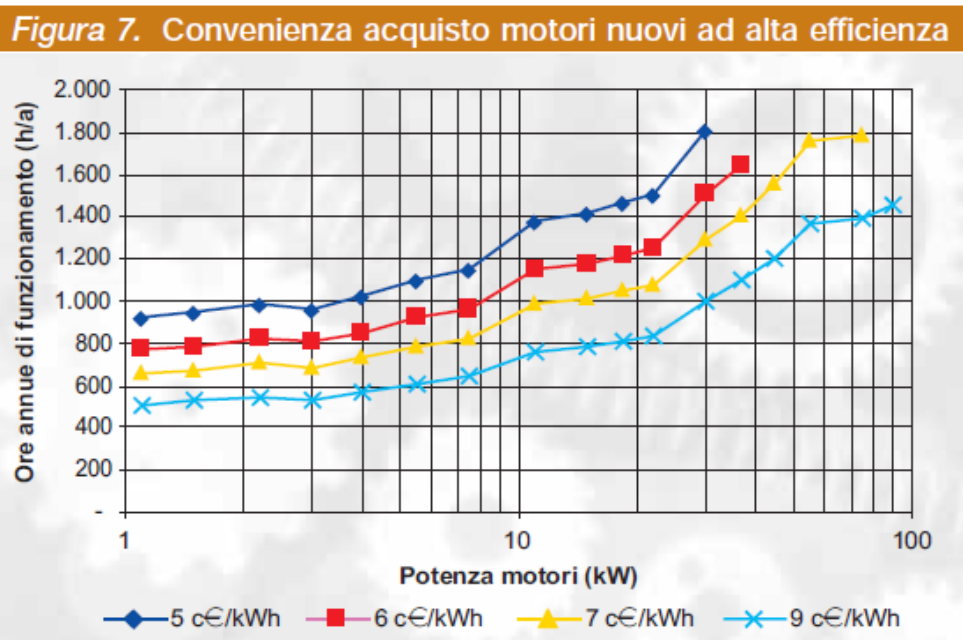
**Figura 6. Convenienza sostituzione motore funzionante con motore ad alta efficienza**



Dal grafico possiamo dedurre che in molte realtà i motori piccola potenza possono essere sostituiti da subito senza aspettare che arrivino alla rottura.

Per ricavare questo grafico, dalla formula del payback al numeratore non apparirà più il costo del riavvolgimento del motore, ma solo il costo del motore ad alta efficienza. Non si dovrà più considerare il decremento del rendimento dovuto al riavvolgimento, ma solo il rendimento del motore in uso. A rigore dovremmo considerare a numeratore, nella formula di calcolo del payback, il costo del motore ad alta efficienza diminuito del valore economico del motore sostituito. Possiamo però dire che non esiste un mercato esteso dei motori usati e quindi abbiamo considerato questo valore pari a zero. Certo, in questo caso le condizioni di convenienza sono più difficili a realizzarsi.

Nel caso, invece, vogliamo acquistare un motore ad alta efficienza nuovo, possiamo tracciare un grafico come il seguente:



Anche nel seguente caso andiamo ad applicare la solita formula del payback introdotta prima. Occorrerà operare i dovuti adeguamenti. In particolare a numeratore ci sarà la differenza di investimento tra motore ad alta efficienza e quello standard. Per il resto tutto rimane come nel caso precedente.

Come possiamo vedere per motori medio-piccoli, anche per poche ore di funzionamento annue, conviene acquistare un motore ad alta efficienza rispetto ad un motore standard. Per motori di potenze più elevate è necessario che le ore di funzionamento annue siano maggiori delle precedenti.

Andiamo ora a fare degli esempi pratici per capire meglio il tempo di recupero sia nel caso di acquisto di un nuovo motore sia nel caso di sostituzione di un vecchio motore.

- Analizziamo il caso della convenienza di voler acquistare un nuovo motore ad alta efficienza EFF1 rispetto ad un motore ad efficienza standard EFF2.

#### ESEMPIO 1: NUOVA INSTALLAZIONE

##### Vantaggi di un motore Eff1 da 3 kW rispetto ad un motore Eff2

- ✓ Prezzo medio motore Eff1 = 280 €      efficienza (Eff1) = 87,6%
- ✓ Prezzo medio motore Eff2 = 220 €      efficienza (Eff2) = 85%
- ✓ Numero annuo di ore di funzionamento = 3.840  
Costo medio del kWh = 0,10 €/kWh  
(valore minimo attuale, previsto in aumento)

##### Risultato:

- ✓ Risparmio annuo = 40 €
- ✓ Payback = 1,5 anni

Il consumo annuo del motore in kWh è dato dalla formula:

$$\text{consumo} = \frac{P \times C \times h}{\eta}$$

Dove:

- P = potenza motore
- C = coefficiente di carico (negli esempi considerato pari a 1)
- h = ore di funzionamento annue
- $\eta$  = rendimento

Come si può osservare dall'esempio vediamo che la differenza di costo tra i due motori è di 60 € ed il tempo di recupero è di 1,5 anni. Questo recupero veloce, come si può vedere, è dovuto ad un elevato numero annuo di ore di funzionamento e da una buona differenza di rendimento cioè di 2,6 %.

Mediamente possiamo tracciare una tabella del seguente tipo per comprendere meglio i tempi di recupero di un nuovo motore ad alta efficienza EFF1 in base alle ore di funzionamento annue:

Ore annue di funzionamento	Payback semplice
2.000	3-4,5 anni
4.000	2-3 anni
6.000	1-2 anni

- Analizziamo il caso della convenienza di voler sostituire un motore funzionante di bassa efficienza con un motore ad alta efficienza EFF1.

## ESEMPIO 2: SOSTITUZIONE DI UN VECCHIO MOTORE

### Vantaggi della sostituzione di un motore da 3 kW in condizioni di carico gravoso

#### Motore esistente:

- ✓ efficienza = 81% (stima conservativa)

#### Motore nuovo:

- ✓ Prezzo medio motore Eff1 = 280 €      efficienza (Eff1) = 87,6%
- ✓ Numero annuo di ore di funzionamento = 7.680  
Costo medio del kWh = 0,10 €/kWh  
(valore minimo attuale, previsto in aumento)

#### Risultato:

- ✓ Risparmio annuo = 214 €
- ✓ Payback = 1,3 anni

Il consumo annuo del motore in kWh è dato dalla formula:

$$\text{consumo} = \frac{P \times C \times h}{\eta}$$

#### Dove:

- P = potenza motore
- C = coefficiente di carico (negli esempi considerato pari a 1)
- h = ore di funzionamento annue
- $\eta$  = rendimento

Come si può osservare da questo esempio la convenienza di sostituire un motore a bassa efficienza con uno ad alta efficienza sta sempre nel numero annuo di ore di funzionamento.

Nella tabella sottostante possiamo riassumere i tempi di recupero in base alle ore di funzionamento e come possiamo vedere per motori piccoli la convenienza di sostituire un motore a bassa efficienza si ha quasi in ogni caso ma nel momento in cui vogliamo sostituire un motore EFF3 con uno ad alta efficienza di grossa potenza, perché risulti conveniente acquistarlo, è necessario che le ore di funzionamento siano abbastanza elevate.

Potenza nominale del motore	Ore annue di funzionamento	Payback semplice
1-11 kW	2.000	0-1,5 anni
	4.000	0-1 anni
	6.000	0-1 anni
11-37,5 kW	2.000	1-3 anni
	4.000	1-1,5 anni
	6.000	0,5-1 anni
37,5-100 kW	2.000	3-7 anni
	4.000	2-4 anni
	6.000	1-2,5 anni

### - Decreti sull'alta efficienza

Non possiamo parlare di motori ad alta efficienza senza citare i decreti sull'efficienza energetica negli usi finali del 24 aprile 2001.

Questi decreti sono connessi con la liberalizzazione del mercato elettrico in Italia: impongono ai distributori di energia elettrica e del gas di raggiungere determinati obiettivi di risparmio energetico incrementando l'efficienza energetica negli usi finali. I distributori soggetti a tale obbligo sono quelli con più di 100 mila clienti. Ai risparmi conseguiti corrispondono dei riconoscimenti sotto forma di titoli di efficienza energetica (TEE) che saranno rilasciati dall'Autorità per l'energia e il gas (AEEG). I TEE sono negoziabili. Oltre ai distributori anche le ESCO (Energy Saving Company) potranno fare interventi di efficienza energetica. I decreti

suggeriscono anche una lista di misure possibili. Una di queste misure è l'utilizzo dei motori ad alta efficienza rispetto a quelli standard.

Con l'utilizzo di un motore ad alta efficienza rispetto ad un motore standard si possono risparmiare molti tep ( tonnellate equivalenti di petrolio ) annui. Nella tabella sottostante abbiamo che per i motori a 4 poli che rientrano nell'accordo CEMEP il risparmio annuo, in funzione del numero di ore, ottenibile dalla sostituzione di un motore standard con uno ad alta efficienza. Anche in questo caso i valori sono indicativi ma validi per una prima valutazione.

**Figura 8. Risparmio energetico in tep/anno**

Potenza kW	1800 Ore/anno	3500 Ore/anno	5500 Ore/anno	8000 Ore/anno
1,1	0,05	0,10	0,15	0,22
1,5	0,06	0,11	0,18	0,26
2,2	0,07	0,14	0,22	0,31
3	0,09	0,17	0,26	0,38
4	0,10	0,19	0,31	0,44
5,5	0,12	0,23	0,37	0,53
7,5	0,15	0,29	0,45	0,66
11	0,17	0,33	0,52	0,75
15	0,22	0,42	0,66	0,96
18,5	0,25	0,48	0,76	1,11
22	0,29	0,55	0,87	1,27
30	0,31	0,60	0,94	1,36
37	0,35	0,68	1,07	1,55
45	0,39	0,76	1,19	1,73
55	0,41	0,81	1,27	1,84
75	0,53	1,04	1,63	2,37
90	0,64	1,24	1,94	2,83

Allo stato attuale l'AEEG non ha ancora emesso la delibera attuativa. Per questo non è ancora possibile fare previsione su come sarà gestito il rapporto tra utenti finali (presso i quali nella maggiore parte dei casi saranno realizzati gli interventi) e i distributori che hanno l'obbligo di rispettare gli obiettivi.

Al momento e con riferimento agli specifici interventi di risparmio energetico in esame, non è possibile valutare il vantaggio economico derivante dall'applicazione dei suddetti decreti alle aziende, mentre è quantificato in 150 – 200 €/tep il riconoscimento economico che l'AEEG elargirà ai grandi distributori ed alle ESCO.

Gli scenari futuri in cui i grandi distributori, le ESCO e gli utenti finali si troveranno ad operare, non sono prevedibili, per cui non è ad oggi quantificabile la quota di riconoscimento economico che andrà a beneficio degli utenti finali, né sono note le modalità operative per effettuare tale trasferimento.

Se per ogni tep risparmiato sarà riconosciuto un valore di 150 € (ma non è detto) si può vedere per esempio che un motore da 15 kW che lavora 3500 ore anno ottiene un beneficio annuo di 63 € contro un costo di acquisto di circa 520 €. Al beneficio dovrà essere aggiunto il flusso di cassa dovuto ai risparmi energetici che, per quanto detto prima, ammontano a circa 133 € anno se il costo dell'energia è di 7 centesimi di Euro. In pratica il tempo di ritorno dell'investimento, grazie ai decreti sull'efficienza energetica, passa da 3,9 a 2,7 anni.

La tabella seguente ci fa comprendere la formula utilizzata per il calcolo dei tep risparmiati:

### CALCOLO DEL RISPARMIO ENERGETICO

Se vogliamo sapere quanto si risparmia utilizzando un motore ad alta efficienza rispetto ad un motore standard basta applicare la seguente formula:

$$R = P \cdot C_c \cdot h \cdot \left( \frac{1}{\text{eff}_{\text{std}}} - \frac{1}{\text{eff}_{\text{hem}}} \right) \cdot 0,22 \cdot 10^{-3}$$

Dove:

- R: risparmio energetico annuo (tep)  
P: potenza di targa del motore (kW),  
 $C_c$ : coefficiente di carico del motore, cioè la percentuale rispetto al pieno carico alla quale lavora il motore,  
h: numero di ore annuo di funzionamento del motore (h/a),  
 $\text{eff}_{\text{std}}$ : rendimento di un motore standard al punto di lavoro,  
 $\text{eff}_{\text{hem}}$ : rendimento del motore ad alta efficienza.

Nella formula la conversione dei kWh in tep è stata effettuata utilizzando  $1 \text{ kWh} = 0,22 \times 10^{-3} \text{ tep}$  come riportato nei decreti.

Anche l'Unione Europea sta dedicando risorse umane ed economiche ai motori ad alta efficienza. A tale proposito è in corso un progetto finanziato nell'ambito del programma SAVE (un programma pluriennale per la promozione dell'efficienza energetica) denominato Motor Challenge Programme (MCP).

Le finalità del progetto sono quelle di promuovere un programma per aiutare le industrie ad incrementare l'efficienza energetica dei motori elettrici e di alcuni sistemi azionati dai motori. Esso è su base volontaria ed è concepito in maniera molto semplice, secondo uno schema che ormai collaudato da altri programmi simili. Alla messa a punto del progetto SAVE partecipano le Agenzie Nazionali per l'Energia di dieci paesi europei. Per l'Italia partecipa l'ENEA.

Le aziende che vorranno partecipare al programma si impegnano ad identificare misure di efficienza energetica nell'ambito dei motori e dei sistemi che utilizzano motori elettrici e a realizzarle secondo un programma stabilito.

A seguito di ciò le aziende potranno ottenere:

- risparmi economici;
- un pubblico riconoscimento per il loro contributo al raggiungimento degli obiettivi di politica energetica dell'Unione Europea;
- un miglioramento dell'immagine derivato dall'uso del logo.

Ogni azienda può partecipare. Per questo, una volta ottemperate le richieste del programma, ogni industria potrà richiedere lo status di Partner. Tale status sarà conferito dalla Commissione previo verifica dei requisiti richiesti. Una volta ottenuto lo status un'azienda potrà fregiarsi del logo simbolo dell'iniziativa.

Al programma potranno aderire anche aziende che forniscono componenti e servizi nel campo degli azionamenti elettrici ed in questo caso essi riceveranno lo status di Endorser (sostenitore). In sostanza attraverso il Motor Challenge Programme si potrà da una parte risparmiare denaro



investendo in motori ad alta efficienza e ottimizzando i sistemi da questi azionati, dall'altra si potrà migliorare l'immagine della propria azienda.

### - Utilizzo dei regolatori di velocità

Per poter avere un maggiore risparmio energetico, oltre all'utilizzo di motori ad alta efficienza, possiamo usare i convertitori di frequenza (chiamati anche inverter) che hanno lo scopo di andare a variare la velocità di un motore elettrico quando non è necessario che funzioni alla velocità nominale. Attraverso l'utilizzo di un inverter possiamo ridurre i normali consumi anche del 60 %.

Le applicazioni principali di un convertitore di frequenza si hanno a livello industriale nell'utilizzo di pompe, ventilatori e compressori dove è spesso indispensabile una regolazione della velocità di questi dispositivi.

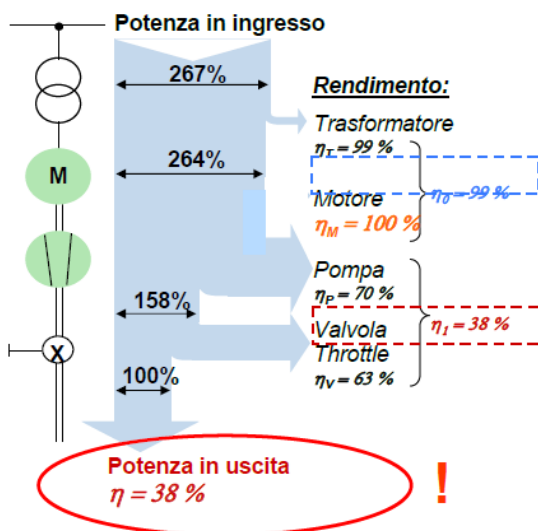
Un motore asincrono trifase collegato direttamente alla rete, per sua natura girerà costantemente alla velocità nominale. Nel caso in cui fosse utilizzato per azionare una pompa o un ventilatore e le esigenze dell'impianto richiedessero di operare a portata variabile, sarebbe necessario prevedere un sistema di regolazione meccanico per controllare la portata del fluido; la regolazione della portata dei fluidi è ottenibile normalmente attraverso l'ausilio di dispositivi di tipo meccanico/idraulico a perdita di carico tipo valvole di strozzamento, serrande, sistemi di bypass, ecc.

Utilizzando un inverter per comandare il motore, è possibile regolare la portata del fluido agendo direttamente sulla velocità del motore attraverso la variazione della frequenza.

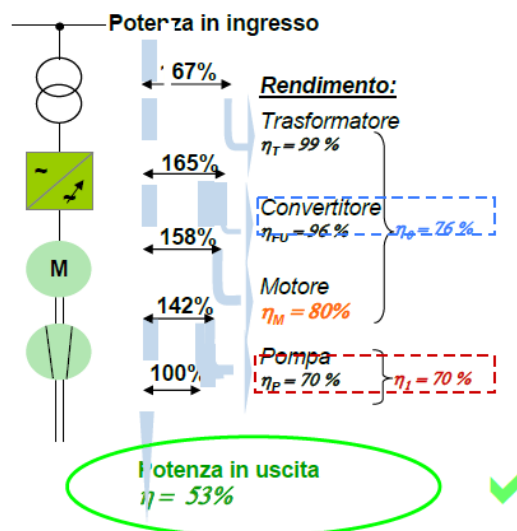
Se si considera un ciclo produttivo che richiede alla pompa o al ventilatore di dimezzare la portata, automaticamente l'inverter dimezzerà la velocità del motore e, ricordando che la potenza richiesta dal carico varia con il cubo della velocità, l'assorbimento energetico scenderebbe da 100 % a solo un ottavo di quello nominale.

Nello schema sottostante si evidenzia la differenza di energia elettrica necessaria a monte del trasformatore per fornire pari lavoro utile su una pompa centrifuga, valutando la soluzione con regolazione a valvola rispetto quella ad inverter. Tenendo conto dell'efficienza di tutti i componenti e delle relative perdite di carico, risulta che, posta a 100 la potenza utile che in entrambi i casi l'impianto deve erogare, con la soluzione a valvola sarà impiegata un'energia pari al 267 % mentre con quella ad inverter basterà una potenza del 167 %. Come si vede c'è una riduzione dei consumi molto evidente.

Portata regolata da una valvola (Throttle)



Portata regolata da una pompa a velocità variabile



Un motore puramente ideale con  $\eta_M = 100\%$ , non utilizzato in modo corretto, può generare uno spreco di energia maggiore di un motore EFF3 utilizzato correttamente

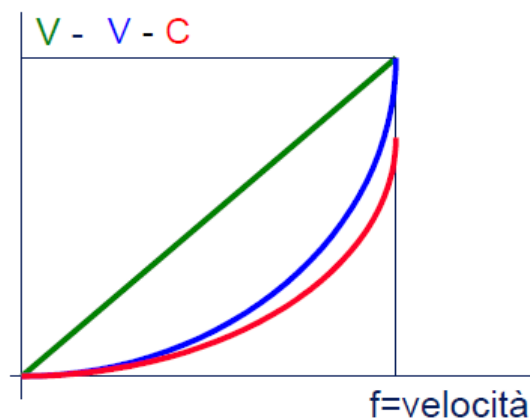
L'utilizzo di un inverter è estremamente importante per ottenere un buon risparmio energetico, infatti se andiamo ad utilizzare un motore ad alta efficienza EFF1 sempre a pieno regime, anche se non è necessario, otteniamo un maggiore consumo rispetto all'utilizzo ad un motore a bassa efficienza EFF3 associato ad un inverter.

### - I vantaggi dell'utilizzo di un inverter

Pompe e ventilatori presentano una caratteristica di coppia resistente all'avanzamento, o meglio alla rotazione, di tipo quadratico (vedi curva rossa) ovvero bassa resistenza a basso regime di giri e alta con l'aumentare della velocità.

I motori elettrici asincroni trifasi a gabbia di scoiattolo rispondono invece alla legge di comando detta tensione – frequenza (vedi curva verde), dove se il rapporto tra le due grandezze elettriche è mantenuto costante il motore è capace di esprimere sempre la stessa coppia all'albero indipendentemente dalla velocità di rotazione.

Con i variatori di velocità è possibile adeguare al meglio l'alimentazione del motore adattando la legge  $V/f$  in funzione del carico (vedi curva blu); sappiamo ad esempio che i fluidi variano le loro caratteristiche al variare della temperatura; essere capaci di rispondere a queste variazioni apporta dei benefici energetici; il risparmio in questo caso dipende tuttavia anche dalle caratteristiche del motore stesso: più  $\cos\phi$  e rendimento sono elevati e minori sono le variazioni di questi due fattori al variare del carico.



Ma come già detto il punto più importante è quello del risparmio energetico ottenibile utilizzando il variatore per variare la portata del fluido in luogo dei sistemi meccanici (serrande, valvole di strozzatura, ecc).

I benefici ed i vantaggi che si possono ottenere complessivamente possono essere così riassunti:

- risparmio di energia considerevole, in funzione delle condizioni di carico
- risparmio sulla potenza installata e in tutte le apparecchiature che stanno a monte del variatore di velocità (esempio trasformatori, gruppi elettrogeni, contattori, ecc)
- risparmio sugli oneri di gestione e manutenzione
- riduzione della corrente di spunto e delle sovrappressioni; riduzione del rumore nei circuiti idraulici
- rifasamento del carico ad un valore di  $\cos\phi$  prossimo ad uno.

Per comprendere meglio i risparmi che si possono ottenere attraverso l'utilizzo di un inverter possiamo fare riferimento al seguente esempio eseguito su dei ventilatori di mandata e di ripresa di un impianto.

## - Esempio di risparmio energetico con l'utilizzo di un inverter

### 1. Ventilatore di mandata

Si tratta di un ventilatore di 55 kW. È un ventilatore attualmente avviato con avvio diretto in rete e parzializzato tramite una serranda in aspirazione. La sua portata viene fatta variare nell'arco della giornata in base al numero di piani attivi all'interno dell'edificio controllato.

Il ventilatore ha i seguenti dati:

- Portata	77000 m <sup>3</sup> / h
- Prevalenza totale	2000 Pa
- Potenza installata	55 kW
- N° giri/min	2480 rpm
- Natura del fluido	aria pulita
- Temperatura di funzionamento	40 °C
- Motore	55 kW con 3000 giri/min
- Cos φ	0,86
- Tensione	380 V
- Giorni funzionamento annui	300 gg/anno
- Ore funzionamento giornaliero	20 h/gg
- Ore funzionamento annue	6000 h/anno
- Portata media di funzionamento	75 % Q nominale e regolata con serranda
- Costo kWh	0,12 €/kWh
- Efficienza ipotizzata ventilatore	88 %
- Efficienza ipotizzata del motore	93 %
- Efficienza ipotizzata della trasmissione	97 %

### 2. Ventilatore estrazione

Si tratta di un ventilatore da 30 kW. È un ventilatore attualmente avviato con avvio diretto in rete e parzializzato tramite una serranda in aspirazione. La sua portata viene fatta variare nell'arco della giornata in base al numero di piani attivi all'interno dell'edificio controllato.

Il ventilatore ha i seguenti dati:

- Portata	68000 m <sup>3</sup> / h
- Prevalenza totale	1010 Pa
- Potenza installata	30 kW
- N° giri/min	1470 rpm
- Natura del fluido	aria pulita
- Temperatura di funzionamento	40 °C
- Motore	30 kW con 1470 rpm
- Tensione	380 V
- Giorni di funzionamento annui	300 gg/anno
- Ore funzionamento giornaliero	20 h/gg
- Ore funzionamento annue	6000 h/anno
- Portata media di funzionamento	75 % Q nominale e regolata con serranda
- Costo kWh	0,12 €/kWh
- Efficienza ipotizzata ventilatore	80 %
- Efficienza ipotizzata del motore	92 %
- Efficienza della trasmissione	97 %

Facendo un'attenta analisi su questi due motori, possiamo scoprire un grande risparmio energetico se andiamo ad utilizzare dei regolatori di velocità.

L'utilizzo di una serranda per la regolazione rappresenta, infatti, un metodo di regolazione estremamente dispendioso.

I motori vengono fatti funzionare al massimo introducendo perdite di carico addizionali sul canale di aspirazione per ottenere la portata necessaria.

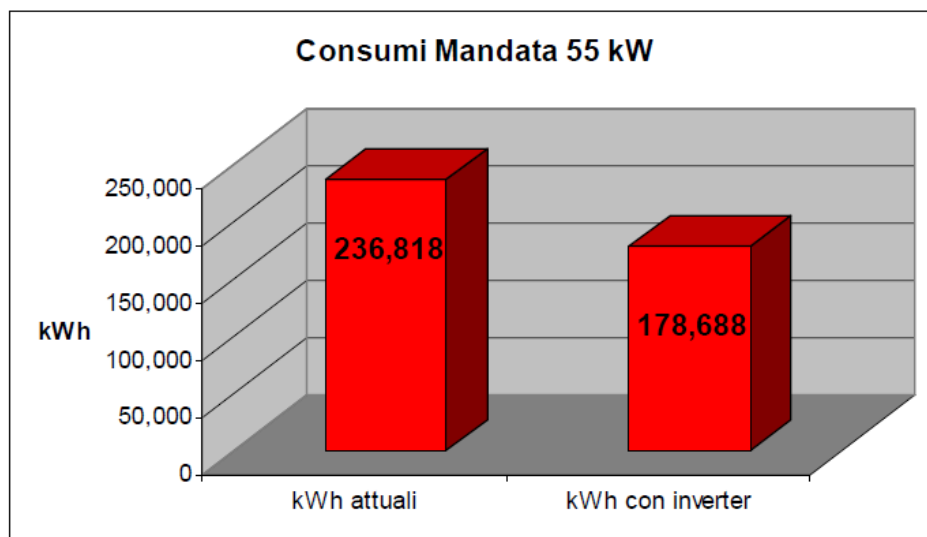
L'utilizzo di un inverter consente, viceversa, la possibilità di elaborare la sola portata necessaria, controllando il flusso direttamente agendo sulla velocità di rotazione del motore.

Viste le particolari condizioni di utilizzo (portate mediamente parzializzate al 75 % durante l'anno) i vantaggi in termini energetici sono estremamente rilevanti. Bisogna, infatti, ricordare che la potenza assorbita in impianti di ventilazione e pompaggio varia con il cubo della portata. Questo significa che una riduzione del 20 % della portata tramite variazione della velocità del motore permette una riduzione teorica prossima al 50 % della potenza assorbita.

Nell'analisi energetica, in via cautelativa, è stata considerata la possibilità di ridurre la velocità di rotazione dei ventilatori ad un valore pari solo al 75 % della velocità nominale. Visto la destinazione d'uso dell'edificio, si potrebbe stimare un risparmio ulteriore riducendo ulteriormente la portata nel momento in cui alcuni piani non risultino occupati durante il giorno.

Valutiamo i consumi energetici stimati dell'applicazione con le due soluzioni a confronto:

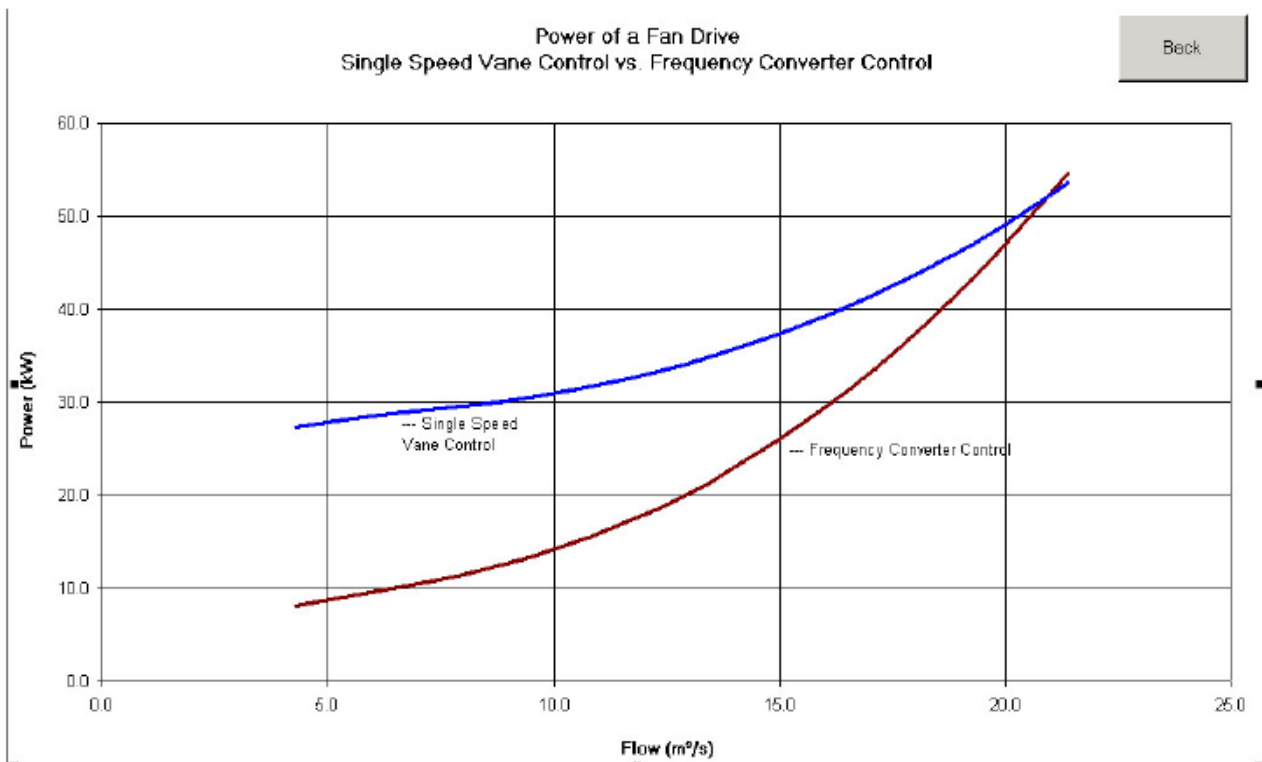
#### *Ventilatore di mandata 55 kW*



<b>Risparmio energetico stimato</b>	<b>58.129 kWh/anno (-24.5%)</b>
<b>Risparmio annuo stimato</b>	<b>6.976 €/anno</b>
<b>Costo dell'Investimento (inverter)</b>	<b>4.300 €</b>
<b>Payback Time</b>	<b>0,6 Anni</b>

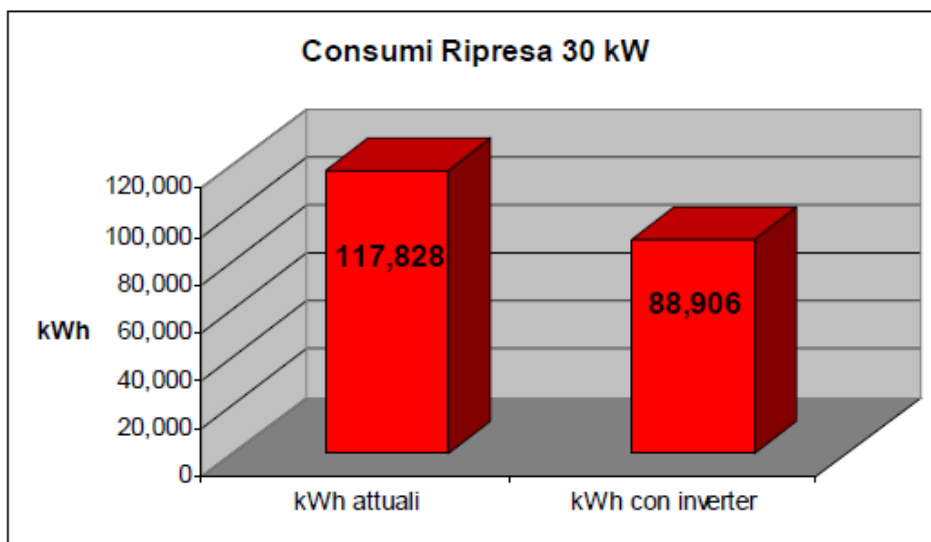
Come possiamo vedere dalla differenza dei due grafici osserviamo un risparmio stimato del 24,5 % che ci permette di recuperare in poco più di sei mesi l'investimento fatto per l'acquisto di un inverter.

Per avere una maggiore idea della potenza risparmiata andiamo a vedere il seguente grafico che ci illustra il confronto, alle diverse portate, degli assorbimenti del ventilatore regolato tramite un inverter e tramite una serranda in aspirazione. La curva rossa rappresenta l'assorbimento di potenza attraverso l'utilizzo dell'inverter, mentre la curva blu rappresenta l'assorbimento di potenza solo con utilizzo di una serranda.



Con l'utilizzo del ventilatore di ripresa possiamo valutare il seguente risparmio.

*Ventilatore di ripresa 30 kW*

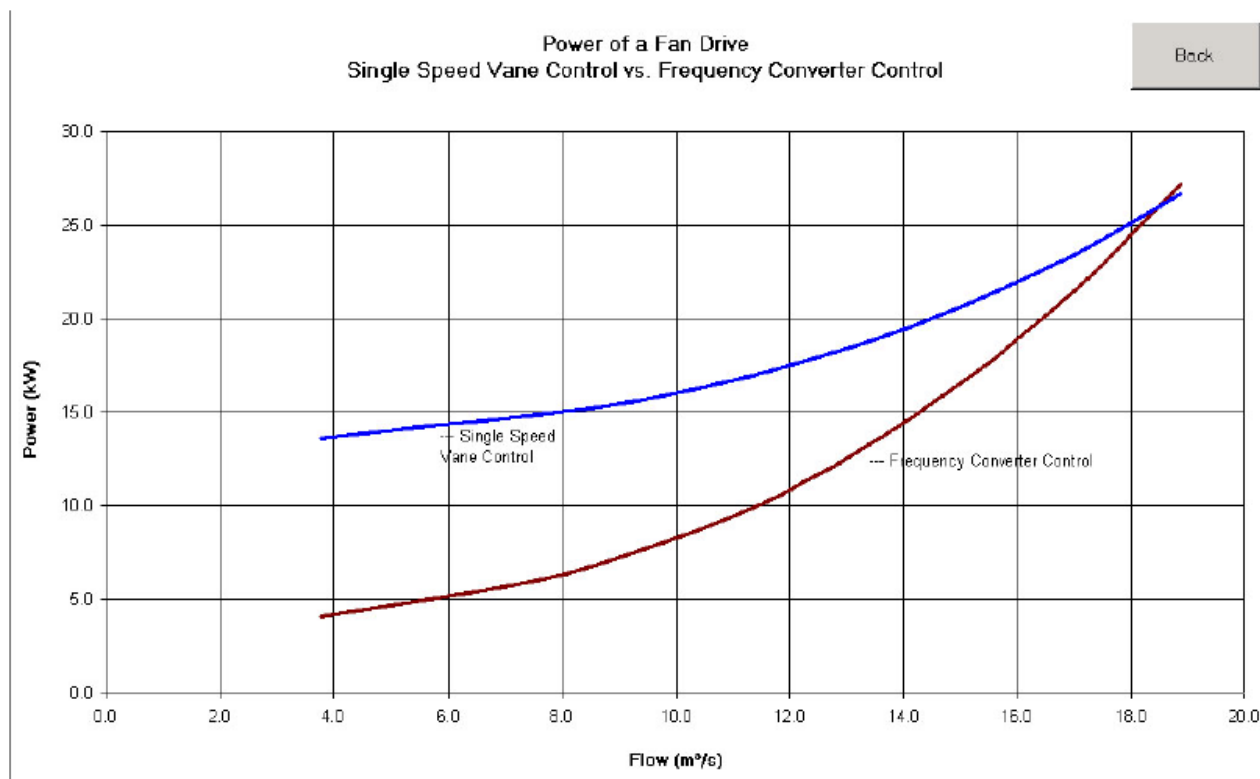


<b>Risparmio energetico stimato</b>	<b>28.922 kWh/anno (-24.5%)</b>
<b>Risparmio annuo stimato</b>	<b>3.471 €/anno</b>
<b>Costo dell'Investimento (inverter)</b>	<b>2.300 €</b>
<b>Payback Time</b>	<b>0,7 Anni</b>

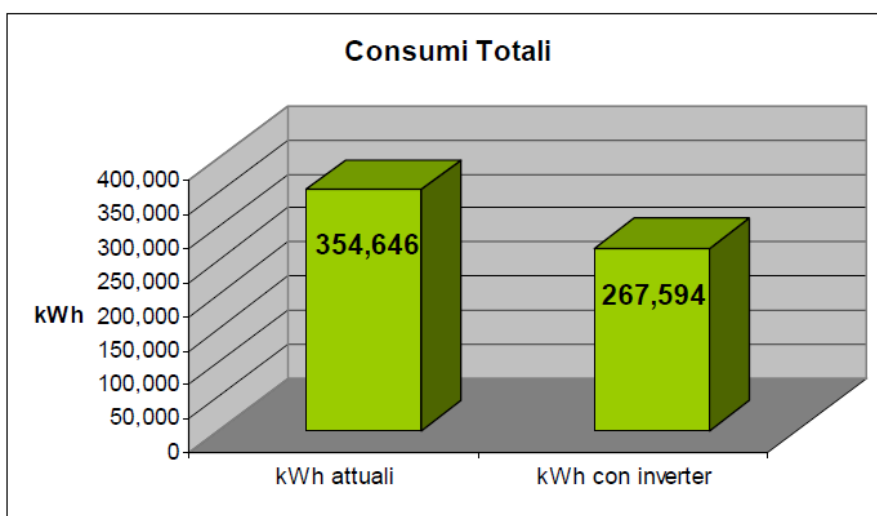
Anche nel seguente caso, dalla differenza dei due grafici possiamo vedere un risparmio energetico del 24,5 %.

L'investimento fatto per l'acquisto dell'inverter, come possiamo vedere, viene recuperato in 0,7 anni.

Anche nel seguente caso andiamo a valutare graficamente il risparmio di potenza che si può avere con l'utilizzo di inverter alle diverse portate di fluido. La curva blu rappresenta l'assorbimento di potenza che abbiamo solo con l'utilizzo di una serranda e la curva rossa rappresenta l'assorbimento di potenza che abbiamo con l'utilizzo di un inverter.



Osservando i risultati finali abbiamo che il risparmio energetico annuo stimato è del 24,5 % ed il tempo di recupero dell'intero investimento è di 0.6 anni.



<b>Risparmio energetico complessivo stimato</b>	<b>87.052 kWh/anno (-24.5%)</b>
<b>Risparmio annuo stimato</b>	<b>10.447 €/anno</b>
<b>Costo complessivo inverter</b>	<b>6.600 €</b>
<b>Payback Time</b>	<b>0,6 Anni</b>

L'utilizzo degli inverter nell'applicazione consente ulteriori vantaggi oltre al risparmio energetico. Il primo vantaggio riguarda la manutenzione e l'usura dei componenti. Grazie al regolatore di velocità i costi di manutenzione vengono ridotti perché il motore, non avviandosi direttamente da rete, non subisce più gli stress dovuti alle correnti di spunto a tutto vantaggio di cuscinetti, gabbia di scoiattolo ed avvolgimenti.

Saranno anche evitati colpi d'aria nelle condotte, si ridurrà la necessità di manutenzione delle cinghie.

Un ulteriore vantaggio riguarda la possibilità di regolazione. Disponendo di un inverter sarà possibile tarare al meglio l'impianto anche al variare delle condizioni di carico ad oggi riscontrate nell'impianto. Sarà anche possibile automatizzare il controllo per ottimizzarlo ulteriormente rispetto alle esigenze. Si eliminerà la necessità di manutenzione degli attuatori oggi in campo e si risolveranno eventuali attuali problemi d'isteresi nel controllo.

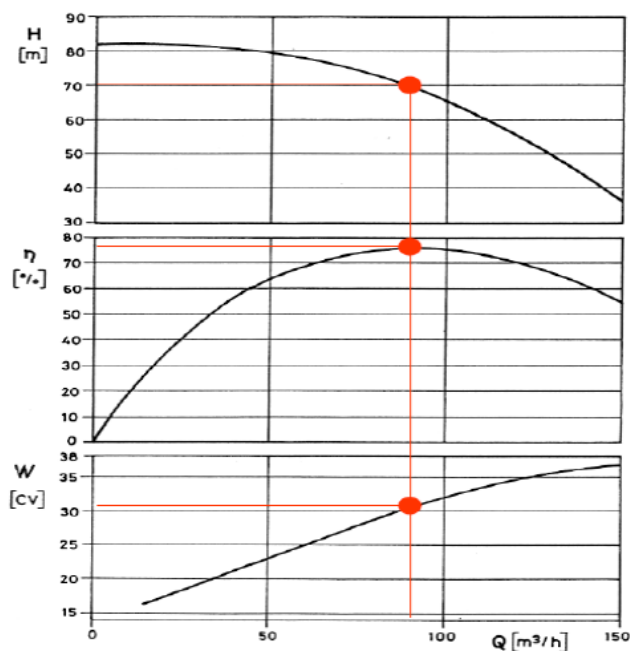
Un terzo vantaggio consiste nella riduzione della rumorosità. La possibilità di togliere le serrande in aspirazione consente di eliminare nel contempo sorgenti di rumorosità indesiderata.

Un'altra cosa molto importante da considerare con l'utilizzo di regolatore di velocità è il fatto di riuscire ad avere un  $\cos\phi$  prossimo all'unità. Questo permette di ridurre la potenza reattiva assorbita o in alternativa elimina la necessità di prevedere un sistema di rifasamento.

Una particolare nota va fatta per quanto concerne l'impatto ambientale. Grazie al risparmio energetico conseguente all'utilizzo degli inverter e alla conseguente minor necessità di produrre energia elettrica, si stima una riduzione delle emissioni di anidride carbonica in ambiente di circa 43 tonnellate/anno.

### - Differenze di rendimento e potenza assorbita di una pompa con utilizzo di serranda o inverter

Per comprendere meglio l'effettivo risparmio energetico che abbiamo attraverso l'utilizzo di regolatori di velocità andiamo a visualizzare i seguenti grafici di prevalenza, rendimento e potenza di una pompa.



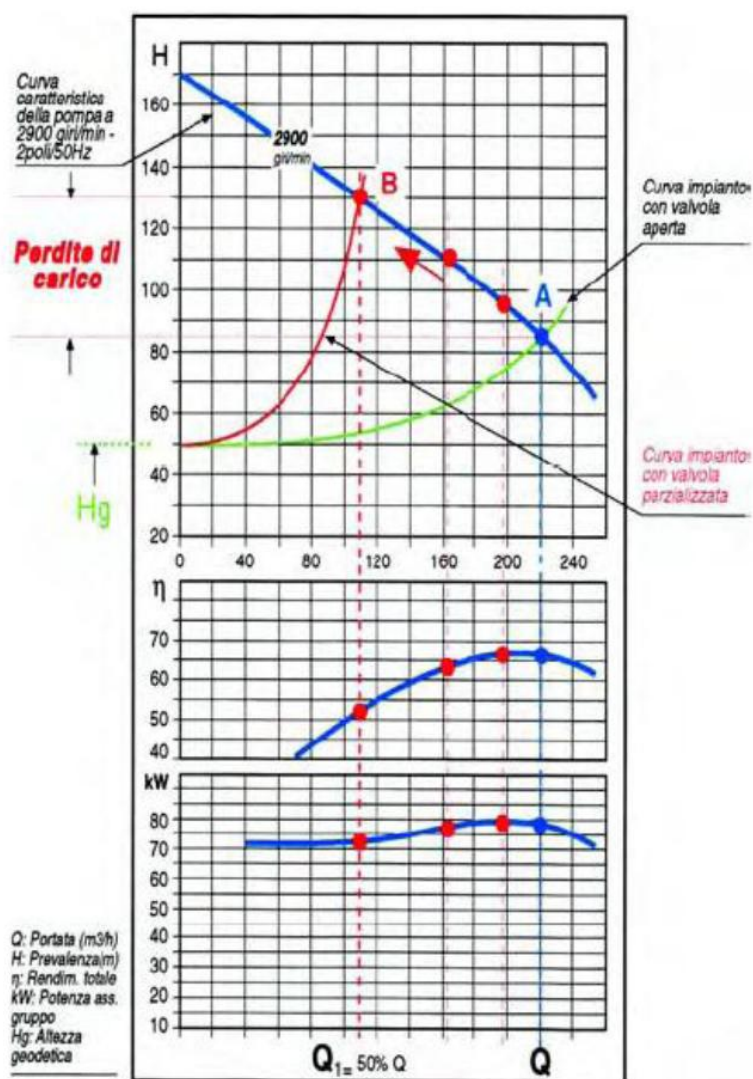
Dal grafico soprastante vediamo che esiste un particolare punto rosso che corrisponde ad una determinata portata dove il rendimento della pompa risulta essere massimo. Se andiamo ad aumentare la portata  $Q$  vediamo che abbiamo una diminuzione della prevalenza  $H$  e una

diminuzione del rendimento. Se vogliamo, invece diminuire la portata  $Q$  vediamo un brusco calo del rendimento.

Si comprende quindi, come già accennato, che in caso di diminuzione della portata sia utile riuscire a regolare la velocità della pompa. Andiamo a comprendere meglio ciò con l'utilizzo dei seguenti grafici illustrativi:

Velocità fissa: la riduzione della portata viene effettuata solo con una serranda. La curva caratteristica della pompa risulta essere quella a 2900 giri/min.

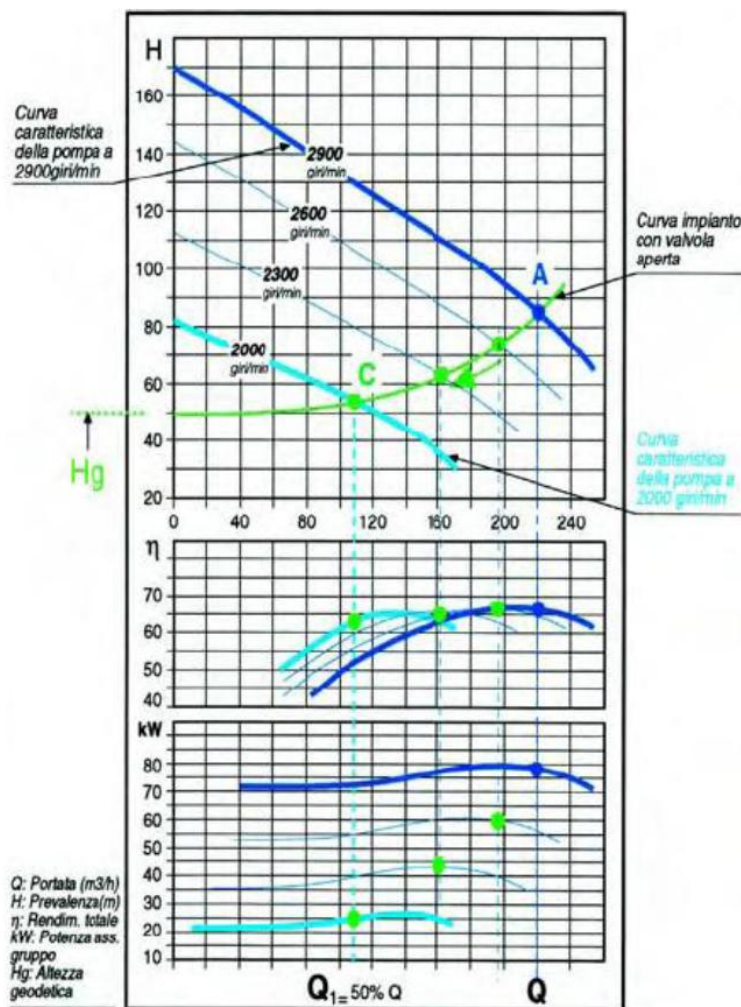
Nel caso la portata sia quella nominale ci troviamo nel punto A del grafico sottostante, ma nel momento in cui io voglio dimezzare il valore della portata con il solo utilizzo di una serranda, vedo che la prevalenza  $H$  aumenta e mi sposto nel punto B della curva caratteristica della pompa. In questo caso, però, il rendimento diminuisce di parecchi punti percentuali (circa 15 %) e la potenza assorbita diminuisce di circa 6 kW.



Velocità variabile: la riduzione della portata viene effettuata con l'utilizzo del regolatore di velocità. Nel seguente caso la curva caratteristica della pompa varia con il diminuire della velocità. Se ho bisogno della portata nominale mi trovo nel punto A della curva caratteristica, ma se ho la necessità di dimezzare la portata potrò diminuire la velocità della pompa da 2900 giri/min a 2000 giri/min abbassando così la curva caratteristica portandomi a lavorare dal punto A al punto C. in questo caso



il rendimento diminuisce di pochi punti percentuali (circa 4 %) e questo è dovuto alle perdite dell'inverter. La potenza assorbita invece diminuisce di circa 45 kW.



### - Uniformità della classificazione dei motori e normative future

L'efficienza energetica è ormai una prerogativa essenziale dei prodotti e dei sistemi industriali moderni. La moltitudine e la diversità delle norme vigenti in materia rendono tuttavia il confronto diretto tra gli indici di prestazione energetica un'opera estremamente ardua. La globalizzazione dei mercati ha comportato la necessità di confrontare i livelli di efficienza dei dispositivi appartenenti alla stessa categoria di prodotto indipendentemente dallo specifico luogo di produzione e giungere così all'armonizzazione delle norme e della legislazione di riferimento: questo infatti è il prerequisito indispensabile per diffondere con successo le tecnologie a supporto dell'efficienza energetica.

Il miglioramento dell'efficienza dei motori dipende dalla riduzione totale di tutti i tipi di perdite che si verificano al loro interno. Per molti anni le norme in uso a livello internazionale per determinare queste perdite erano due cioè la IEC 60034-2 e la IEEE 112-B.

La IEC 60034-2 era utilizzata prevalentemente in Europa, India e Cina e in precedenza Australia e Nuova Zelanda. Il metodo stabilito dalla IEEE 112-B era adottato in Nord America e nei paesi con fonti di alimentazione a 60 Hz.

Nell'Unione Europea l'efficienza veniva determinata in base al metodo descritto nella IEC 60034-2. L'accordo volontario del CEMEP (Comitato Europeo Costruttori Macchine Rotanti ed Elettronica di Potenza) classificava i motori secondo le tre classi di efficienza già elencate: EFF1, EFF2 e EFF3. Negli Stati Uniti, il metodo per la determinazione dell'efficienza si basava sulla norma IEEE 112-B. Le norme MEPS (Minimum Energy-efficient Performance Standards) per tutti i motori prodotti o utilizzati negli Stati Uniti erano definite nell'Energy Policy Act.

Le soluzioni in uso negli altri paesi rappresentavano un adeguamento all'approccio europeo e americano e vennero quindi armonizzate o equiparate alle norme IEC 60034-2 o IEEE 112-B.

In Brasile, ad esempio, si usa un metodo di prova basato sulla norma IEEE 112-B, ma gli attuali standard MEPS sono diversi da quelli utilizzati negli Stati Uniti. In India, i livelli di efficienza sono stati armonizzati secondo le direttive del CEMEP, ma il metodo di prova si basa sulla normativa locale e non sulla norma IEC.

L'esistenza di metodi di prova e sistemi di etichettatura differenti causava problemi quando si trattava di confrontare l'efficienza dei diversi prodotti. Anche la nomenclatura utilizzata nei diversi paesi creava non poche difficoltà. La definizione "motore ad alta efficienza" poteva avere un significato totalmente diverso da paese a paese.

Per eliminare la ridondanza delle pratiche di standardizzazione esistenti e imboccare la via dell'unità sono stati compiuti notevoli sforzi.

Nel 2008 la norma IEC 60034-30 ha definito le nuove classi di efficienza IE1, IE2 e IE3 per motori da 0,75 kW a 375 kW di potenza, le quali sono state armonizzate con le normative brasiliane con quelle americane.

- IE1: Motore a rendimento standard paragonabile all'EFF2
- IE2: Motore ad alto rendimento paragonabile all'EFF1
- IE3: Motore ad altissima efficienza
- IE4: Motore Super Premium ancora in fase di studio

I motori esclusi dall'applicazione della seguente norma sono:

- Motori programmati per operare totalmente immersi in un liquido
- Motori completamente integrati in un progetto (es. pompa o ventola) dove non sia possibile testare il rendimento del motore in maniera indipendente dal resto del progetto
- Motori autofrenanti
- Motori progettati per operare ad altitudini superiori a 1000 metri sul livello del mare, in luoghi con temperatura ambiente superiori a 40 °C o minore di -15 °C, con temperatura di lavoro superiori ai 400 °C.

Le norme che sono state create per incentivare la diffusione di questi motori sono le seguenti.

- 22 Luglio 2009: La Commissione Europea ha varato la normativa MEPS che introduce i livelli di efficienza minimi per i motori elettrici commercializzati all'interno dell'Unione Europea con lo scopo di diminuire i costi energetici e le emissioni di CO2.
- 16 Giugno 2011: Tutti i motori devono avere un livello minimo di efficienza IE2.
- 1 Gennaio 2015: I motori con potenza da 7,5 a 375 kW dovranno avere efficienza IE3 o IE2 nel caso il motore sia alimentato da un inverter.
- 1 Gennaio 2017: I motori con potenza da 0,75 a 375 kW dovranno avere efficienza IE3 o IE2 nel caso il motore sia alimentato da inverter.

Con i seguenti termini di scadenza i motori con efficienza IE1 non potranno più essere commercializzati nell'Unione Europea a partire dal 16 Giugno 2011. Dopo questa data tutti i motori dovranno avere un livello minimo di efficienza IE2. Tuttavia sarà possibile continuare a produrre motori IE1 destinati a quei mercati dove non esistono livelli minimi di efficienza richiesti.

## - Approfondimento sulle normative IEC

L'IEC è l'International Electrotechnical Commission (Commissione Elettrotecnica Internazionale) cioè una organizzazione internazionale per la definizione di standard in materia di elettricità, elettronica e tecnologie correlate. Molti dei suoi standard sono definiti in collaborazione con l'ISO (Organizzazione internazionale per la formazione e con il CEI).

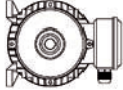
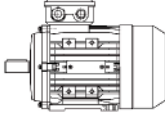
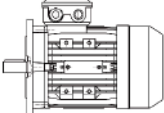
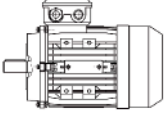
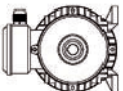
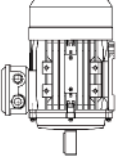
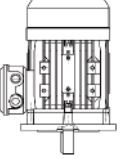
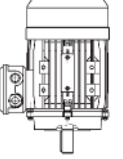
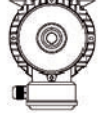
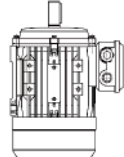
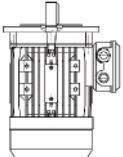
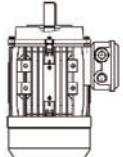
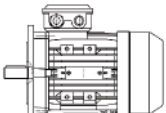
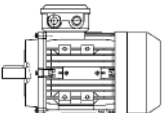
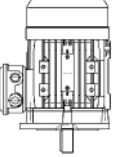
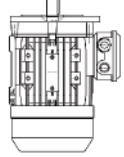
La normativa IEC 61508 è una norma europea ed internazionale ed è stata emessa e recepita in Italia come CEI EN 61508. L'argomento di questa norma riguarda la "Sicurezza funzionale dei sistemi di sicurezza elettrici, elettronici ed elettronici programmabili (E/E/PE)". In Italia la legge n.186 del 01/03/1968, nei suoi articoli indica che tutte le apparecchiature, macchinari, installazioni ed impianti elettrici ed elettronici devono essere realizzati a regola d'arte e sono tali quando realizzati secondo le norme CEI. Pertanto i sistemi elettrici ed elettronici programmabili per applicazioni di sicurezza, per essere a norma devono fare riferimento alla norma CEI EN 61508. Da notare che su analoghi principi e metodi della IEC 61508 sono state emanate norme applicabili a settori specifici: la IEC 61511 per i processi industriali, IEC 62061 per la sicurezza delle macchine, le EN 50126, EN 50128, EN 50129 per la segnaletica di controllo nel settore ferroviario, IEC 61513 per le centrali elettriche a combustibile nucleare, IEC 61800-5-1 per la regolazione di velocità e carico negli azionamenti.

Per quanto riguarda le normative IEC sulle macchine elettriche possiamo riassumerle in questa tabella:

2 - NORMATIVE DI RIFERIMENTO / REFERENCE STANDARDS	CEI	IEC
Prescrizioni generali per macchine elettriche rotanti <i>General requirements for rotating electrical machines</i>	CEI EN 60034-1	IEC 60034-1
Marcatura dei terminali e senso di rotazione per macchine elettriche rotanti <i>Terminal markings and direction of rotation of rotating machines</i>	CEI 2-8	IEC 60034-8
Metodi di raffreddamento delle macchine elettriche <i>Methods of cooling for electrical machines</i>	CEI EN 60034-6	IEC 60034-6
Dimensioni e potenze nominali per macchine elettriche rotanti <i>Dimensions and output ratings for rotating electrical machines</i>	EN 50347	IEC 60072
Classificazione dei gradi di protezione delle macchine elettriche rotanti <i>Classification of degree of protection provided by enclosures for rotating machines</i>	CEI EN 60034-5	IEC 60034-5
Limiti di rumorosità <i>Noise limits</i>	CEI EN 60034-9	IEC 60034-9
Sigle di designazione delle forme costruttive e dei tipi di installazione <i>Classification of type of construction and mounting arrangements</i>	CEI EN 60034-7	IEC 60034-7
Tensione nominale per i sistemi di distribuzione pubblica dell'energia elettrica a bassa tensione <i>Rated voltage for low voltage mains power</i>	CEI 8-6	IEC 60038
Grado di vibrazione delle macchine elettriche <i>Vibration level of electric machines</i>	CEI EN 60034-14	IEC 60034-14

Queste normative prevedono varie argomentazioni. Per motori SMEM abbiamo per esempio:

- Forme costruttive: la normativa IEC 34-7 prevede due modi alternativi di definire la forma costruttiva (posizione di montaggio) di un motore elettrico: il primo definito dalle lettere IM (International Mounting) seguite da una lettera (B = albero orizzontale; V = albero verticale) e da un numero, il secondo è un codice più generale composto dalle lettere IM e da quattro numeri.

Motori B3 con piedi <i>B3 motors with foot mounting</i>		Motore B5 con flangia <i>Flange mounted B5 motors</i>		Motore B14 con flangia <i>Flange mounted B14 motors</i>	
IM 1051 (IM B6)	IM 1001 (IM B3)	IM 3001 (IM B5)	IM 3601 (IM B14)		
					
IM 1061 (IM B7)	IM 1011 (IM V5)	IM 3011 (IM V1)	IM 3611 (IM V18)		
					
IM 1071 (IM B8)	IM 1031 (IM V6)	IM 3031 (IM V3)	IM 3631 (IM V19)		
					
IM 2001 (IM B35) (B3/B5)	IM 2101 (IM B34) (B3/B14)	IM 2011 (IM V15) (V1/V5)	IM 2031 (IM V36) (V3/V6)		
					

- Tolleranze: nella tabella sottostante andiamo a riportare le tolleranze delle caratteristiche elettriche e funzionali dei motori elettrici secondo le norme CEI EN 60034-1.

Caratteristica / <i>Specification</i>		Tolleranza / <i>Tolerance</i>	
Rendimento / <i>Efficiency</i>	$\eta$	- 0,15 (1- $\eta$ ) $P \leq 50$ kW - 0,10 (1- $\eta$ ) $P > 50$ kW	
Fattore di potenza / <i>Power factor</i>	$\varphi$	- (1-cos $\varphi$ )/6 min 0,02 max 0,07	
Scorrimento / <i>Sliding</i>		$\pm 20\%$ ( $\pm 30\%$ per/for $P < 1$ kW)	
Corrente a rotore bloccato / <i>Locked rotor current</i>	$I_s$	+ 20%	
Momento a rotore bloccato / <i>Locked rotor torque</i>	$C_s$	- 15% + 20%	
Momento massimo / <i>Max torque</i>	$C_{max}$	- 10%	
Momento di inerzia / <i>Moment of inertia</i>	J	$\pm 10\%$	

- 1) Quando è specificata una tolleranza in un solo senso il valore non ha limiti nell'altro senso.
- 2) Il valore +25% può essere superato previo accordo
- 3) A condizione che con l'applicazione di questa tolleranza il momento torcente resti uguale a 1,6 volte  $C_n$  secondo CEI EN 60034-1.

- Le tolleranze meccaniche: sono riportate nella seguente tabella in base alle norme IEC:

Componente / Component	Dimensioni / Dimensions	Tolleranza / Tolerance
Altezza d'Asse / Axis Height	H fino grandezza 250 / up to frame 250 H oltre grandezza 250 / over frame 250	- 0,5 mm. - 1 mm.
Estremità albero / Shaft end	D-DA Ø 11 - 28 Ø 38 - 48 Ø ≥ 55	j6 k6 m6
Chiavetta / Key	F - FA	h9
Flangia / Flange	N Ø < 250 Ø ≥ 250	j6 h6

- I materiali: riportiamo i tipi di materiali con i quali devono essere costruiti i motori elettrici

Componenti / Components	Grandezze / Size	Tipo di materiali / Material type
Cassa statore / Stator casing	56-160 160-355	alluminio/aluminium * ghisa/cast iron
Scudo anteriore e posteriore Front and back endshield	56-160 160-355	alluminio/aluminium * ghisa/cast iron
Copriventola / Fan cover	56-355	metallo/metal
Ventola / Cooling fan	56-355	termoplastico/thermoplastic **
Coprimorsettiera / Terminal box	56-160 160-355	alluminio/aluminium ghisa/cast iron

\* grandezza 71-132: ghisa su richiesta

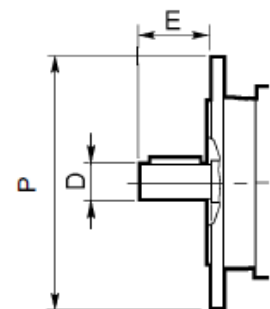
\*\*alluminio su richiesta

L'albero motore in acciaio C 45 con estremità cilindriche, foro filettato in testa e linguetta unificata.

- Dimensioni principali di accoppiamento flangia/albero:

**ESTREMITÀ DI ALBERO Dx E - FLANGIA P / SHAFT END Dx E - FLANGE P**  
grandezza motore / motor size

IM	56	63	71	80	90	100-112	132
<b>B5</b>	9x20-120	11x23-140	14x30-180	19x40-200	24x50-200	28x60-250	38x80-300
<b>B5/R</b>			11x23-140 14x30-140	14x30-160 19x40-160	19x40-160 24x50-160	24x50-200 28x60-200	28x60-250 38x80-250
<b>B14</b>	9x20-80	11x23-90	14x30-105	19x40-120	24x50-140	28x60-160	38x80-200
<b>B14/G</b>		9x20-120* 11x23-120*	11x23-140* 14x30-140*	14x30-160* 19x40-160*	19x40-160* 24x50-160*	24x50-200* 28x60-200*	28x60-250* 38x80-250*



IM	160	180	200	225	250	280	315	355
<b>B5</b>	42x110-350	48x110-350	55x110-400	60x140-450 55x110-450 (2 poli)	65x140-550 60x140-550 (2 poli)	75x140-550 65x140-550 (2 poli)	80x170-660 65x140-660 (2 poli)	95x170-800 75x140-800 (2 poli)
<b>B5/R</b>								
<b>B14</b>	42x110-250							
<b>B14/G</b>								

\*fori filettati

- **Rumorosità:** nella tabella sottostante sono riportati i valori nominali secondo lo standard di produzione del livello di potenza sonora LWA dB(A) e livello medio di pressione sonora LpA\* dB(A) validi per motore a vuoto e per frequenze di alimentazione a 50 Hz. Per frequenze a 60 Hz aumentare i valori di 3-4 dB(A).

grandezza motore motor size	L <sub>WA</sub>	L <sub>pA</sub>	L <sub>WA</sub>	L <sub>pA</sub>	L <sub>WA</sub>	L <sub>pA</sub>	L <sub>WA</sub>	L <sub>pA</sub>
	2 POLI / 2 POLES		4 POLI / 4 POLES		6 POLI / 6 POLES		8 POLI / 8 POLES	
56	67	58	61	52				
63	70	61	61	52	59	50		
71	73	64	64	55	61	52	59	50
80	76	67	67	58	63	54	61	52
90	77	68	70	61	66	57	65	56
100	78	69	73	64	70	61	68	59
112	83	74	74	65	72	63	70	61
132	86	77	80	71	78	69	73	64
160	84	75	78	69	72	63	68	59
180	88	79	81	72	80	71	71	62
200	88	79	81	72	75	66	69	60
225	88	79	81	72	78	69	73	64
250	88	79	84	75	81	72	73	64
280	87	78	83	74	82	73	79	70
315	94	85	88	79	84	75	82	73
355	99	90	89	80	85	76	86	77

\*Media dei valori misurati a 1 m dalla superficie esterna del motore situato in campo libero e su piano riflettente

- **Vibrazioni:** I rotori dei motori sono bilanciati dinamicamente, con mezza chiavetta nella sua posizione sull'albero motore. L'esecuzione standard dei motori è in grado di qualità delle vibrazioni N (normale) secondo le norme DIS ISO e le norme IEC 34-14.

















Su richiesta speciale i motori possono essere eseguiti nei gradi R o S. Le caratteristiche dei singoli gradi di qualità delle vibrazioni sono indicate nella tabella seguente.

grado di qualità delle vibrazioni intensity of vibrations	velocità di rotazione rated speed of motor	velocità effettiva delle vibrazioni ammissibili (mm/s) permissible effective speed of vibrations (mm/s)		
		grandezza motore / motor size 56 - 132	grandezza motore / motor size 160 - 225	grandezza motore / motor size 250 - 355
		<b>N</b> (normale - normal)	600 - 3600	1,8
<b>R</b> (ridotto - reduced)	600 - 3600 > 1800 - 3600	0,71 1,12	1,12 1,8	1,8 2,8
<b>S</b> (speciale - special)	600 - 1800 > 1800 - 3600	0,45 0,71	0,71 1,12	1,12 1,8

- **Grado di protezione IP:** La scelta di un corretto grado di protezione è necessaria per poter ottenere un funzionamento ottimale e duraturo del motore, in relazione alle condizioni dell'ambiente ove lo stesso è destinato ad essere impiegato. La classificazione in accordo alla norma CEI EN 60034-5, è composta dalla sigla IP (International Protection) seguita da una prima cifra 0 – 6 che determina la protezione contro il contatto e l'ingresso di corpi solidi; una seconda cifra 0 – 8 determina la protezione contro l'infiltrazione dell'acqua.

PRIMA CIFRA / FIRST DIGIT

SECONDA CIFRA / SECOND DIGIT

<b>0</b>		Non protetto <i>Not protected</i>	<b>0</b>		Non protetto <i>Not protected</i>
<b>1</b>		Protetto contro corpi solidi estranei di $\varnothing \geq 50$ mm. <i>Protected against estraneous solid bodies having <math>\varnothing \geq 50</math> mm.</i>	<b>1</b>		Protetto contro la caduta verticale di gocce d'acqua <i>Protected against vertical water drops</i>
<b>2</b>		Protetto contro corpi solidi estranei di $\varnothing \geq 12,5$ mm. <i>Protected against estraneous solid bodies having <math>\varnothing \geq 12,5</math> mm.</i>	<b>2</b>		Protetto contro la caduta verticale di gocce d'acqua con un'inclinazione fino a 15° <i>Protected against vertical water drops inclined up to 15°</i>
<b>3</b>		Protetto contro corpi solidi estranei di $\varnothing \geq 2,5$ mm. <i>Protected against estraneous solid bodies having <math>\varnothing \geq 2,5</math> mm.</i>	<b>3</b>		Protetto contro la pioggia <i>Protected against rain</i>
<b>4</b>		Protetto contro corpi solidi estranei di $\varnothing \geq 1,0$ mm. <i>Protected against estraneous solid bodies having <math>\varnothing \geq 1,0</math> mm.</i>	<b>4</b>		Protetto contro gli spruzzi d'acqua da tutte le direzioni <i>Protected against water splashes</i>
<b>5</b>		Protetto contro la polvere <i>Protected against dust</i>	<b>5</b>		Protetto contro i getti d'acqua <i>Protected against jets of water</i>
<b>6</b>		Nessun ingresso di polvere <i>No dust ingress</i>	<b>6</b>		Protetto contro getti d'acqua a pressione <i>Protected against powerful jets of water</i>
			<b>7</b>		Protetto contro gli effetti dell'immersione temporanea <i>Protected against effects of temporary immersion</i>
			<b>8</b>		Protetto contro gli effetti dell'immersione continua <i>Protected against effects of continuous immersion</i>

## - Introduzione dei motori alta efficienza in Italia

Per riuscire a favorire l'introduzione in Italia dei motori ad alta efficienza e dei convertitori di velocità il governo italiano ha introdotto un insieme di leggi nella Finanziaria del 2008.

Le leggi presentate dal governo permettono di beneficiare di una detrazione d'imposta lorda pari al 20 % della spesa effettivamente sostenuta e documentata per l'acquisto di un motore EFF1 o di un variatore di velocità.

1. Per beneficiare dell'incentivo per gli inverter è necessario che:

- L'inverter deve essere utilizzato su impianti con potenza compresa tra 7,5 e 90 kW
- L'inverter deve essere utilizzato unicamente sul suolo nazionale
- Il rimborso del 20 % è valido solo per valori d'acquisto e installazione inferiori a quelli riportati nella seguente tabella

Potenza nominale (kW)	Spesa massima ammissibile per acquisto singolo variatore di velocità (inverter) (euro)	Spesa ammissibile per installazione singolo variatore di velocità (inverter) (euro)	Spesa massima ammissibile totale per singolo variatore di velocità (inverter) (euro)
7,5	1200	200	1400
11	1450	200	1650
15	1850	200	2050
18,5	2400	300	2700
22	2700	300	3000
30	3400	300	3700
37	3800	400	4200
45	4600	400	5000
55	5300	400	5700
75	6200	500	6700
90	7700	500	8200

2. Per beneficiare dell'incentivo per i motori è necessario che:

- Il motore deve avere una potenza elettrica compresa tra i 5 e 90 kW
- I rendimenti minimi dei motori utilizzati devono soddisfare i valori minimi riportati nella seguente tabella

Potenza nominale kW	2 poli	4 poli
5,5	88,6%	89,2%
7,5	89,5%	90,1%
11	90,5%	91,0%
15	91,3%	91,8%
18,5	91,8%	92,2%
22	92,2%	92,6%
30	92,9%	93,2%
37	93,3%	93,6%
45	93,7%	93,9%
55	94,0%	94,2%
75	94,6%	94,7%
90	95,0%	95,0%



- Il rimborso del 20 % è valido solo per valori d'acquisto e installazione inferiori a quelli riportati nella seguente tabella costi

Potenza nominale (kW)	Spesa massima ammissibile per acquisto singolo motore (euro)	Spesa ammissibile per installazione singolo motore (euro)	Spesa massima ammissibile totale per singolo motore (euro)
5,5	700	100	800
7,5	850	100	950
11	1000	100	1100
15	1200	100	1300
18,5	1500	150	1650
22	1800	150	1950
30	2200	150	2350
37	2600	150	2750
45	3300	200	3500
55	4000	200	4200
75	5300	200	5500
90	6100	200	6300

In nessun caso la detrazione potrà superare i 1500 euro per ciascun apparecchio.

I beneficiari di queste concessioni devono conservare le fatture d'acquisto e installazione nonché la certificazione del produttore che attesti il rispetto dei requisiti previsti per poterle presentare all'eventuale richiesta degli Uffici Finanziari. Oltre a questo è necessario compilare una scheda riepilogativa e inviarla all'ENEA conservando le ricevute di spedizione. Le schede saranno utilizzate dall'Enea per effettuare il monitoraggio sull'energia risparmiata. Infine, nel caso in cui il beneficiario decida di disfarsi dei motori sostituiti, questi devono essere consegnati a recuperatori autorizzati che provvedano al loro riciclaggio.



## **CAPITOLO 3: INVERTER**

L'inverter è un dispositivo elettronico atto a generare una corrente alternata a partire da una corrente continua; talvolta viene anche detto "convertitore statico di frequenza".

In linea di massima si individuano due tipi di inverter: a frequenza costante ed a frequenza variabile.

### **- Inverter a frequenza costante**

L'inverter a frequenza costante più diffuso è quello che troviamo all'interno dei Gruppi di Continuità (UPS), i dispositivi usati per alimentare i computer in caso di black-out.

Nel Gruppo di Continuità la tensione di rete viene raddrizzata in corrente continua a livello compatibile con una batteria interna, e quindi viene riconvertita dall'inverter in corrente alternata a valori standard 230 V / 50 Hz.

Nel caso manchi l'alimentazione, l'inverter continua ad alimentare il carico prelevando l'energia dalla batteria fino alla completa scarica.

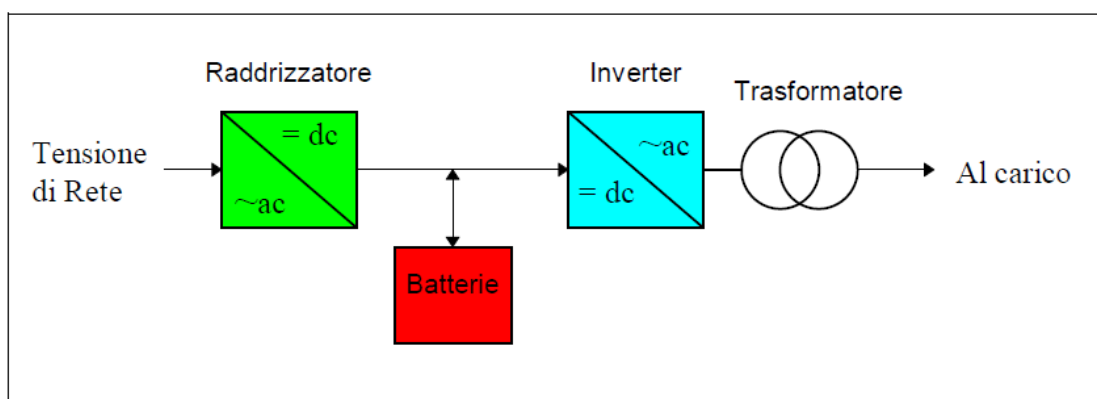


Figura 1.1 Tipico schema a blocchi di un UPS.

Questo tipo di apparecchio spazia da potenze molto piccole di 200-300 W a potenze più elevate come per esempio 20-30 kW e oltre.

Un altro utilizzo degli inverter a frequenza a frequenza costante è connesso con l'energia solare. L'inverter, in tal caso serve per convertire l'energia elettrica prodotta dai pannelli fotovoltaici in corrente continua in corrente alternata a 50 Hz perché sia riversata nella rete pubblica o verso le utenze tradizionali a 230 V.

Questo dispositivo, nel caso di allacciamento alle reti pubbliche, è comunque oggetto di particolari normative sia CEI che ENEL.

### **- Inverter a frequenza variabile**

L'inverter a frequenza variabile serve per regolare la velocità dei motori trifasi. Come si vedrà in seguito, infatti, la velocità di rotazione del motore è strettamente connessa con la frequenza della tensione con cui lo si alimenta.

Nell'inverter la tensione alternata della rete (trifase o monofase) viene raddrizzata in corrente continua e quindi viene riconvertita in corrente alternata trifase a frequenza variabile per alimentare il motore.

Il valore della frequenza in uscita può quindi essere scelto a piacere dall'utilizzatore a seconda della velocità di funzionamento che si vuole far raggiungere al motore.

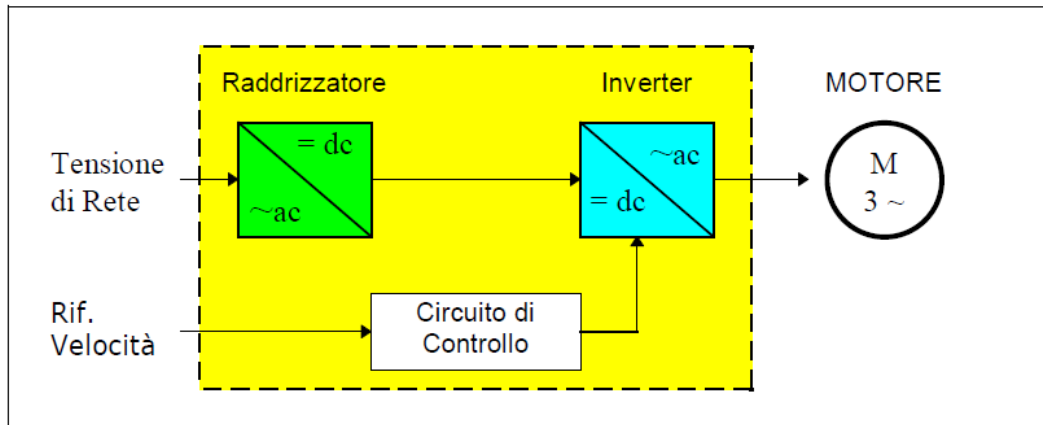


Figura 1.2 Tipico schema a blocchi di un Inverter per motore trifase.

Sul mercato sono disponibili taglie che vanno da potenze minime di 500 W fino a oltre 500 kW con la tensione industriale di 400 V, ed addirittura a 10 MW con gli inverter a 6000 V.

In linea generale un inverter potrebbe essere utilizzato sia per motori sincroni che per motori asincroni, ma in questa trattazione ci occuperemo solamente del motore asincrono in bassa tensione.

I vantaggi sia degli UPS che degli inverter per motori asincroni trifasi sono il vantaggio di assorbire corrente dalla rete di alimentazione praticamente in fase con la tensione ( $\cos\phi = 0,95$ ). In pratica il  $\cos\phi$  del carico non si riflette sulla corrente assorbita, e quindi non deve essere rifasato.

Questa è una caratteristica dello stadio raddrizzatore di ingresso, che per conto ha un assorbimento di corrente non proprio lineare.

Lo svantaggio degli inverter a frequenza variabile è quello di essere dei veri e propri generatori di disturbi elettromagnetici.

Questi “disturbi” vanno verso il carico, verso la rete di alimentazione, e verso l’ambiente circostante sotto forma di radiodisturbi.

I costruttori forniscono comunque dei dispositivi, da installare assieme all’inverter, adatti a contenere questi problemi, e forniscono inoltre i consigli adatti per ottenere un’installazione che rispetti le Norme EN e la Direttiva sulla compatibilità elettromagnetica (EMC).

## - Il motore asincrono trifase

Il mercato dei motori elettrici oggi è dominato prevalentemente dal motore asincrono trifase, un tipo di motore molto semplice, robusto ed economico.

Questo motore negli anni ha guadagnato una fetta di mercato sempre maggiore, occupando, grazie all’elettronica di controllo, anche settori che un tempo erano ad uso esclusivo dei motori in corrente continua.

L’uso dei motori asincroni va dalle pompe ai ventilatori, dagli ascensori alle gru, dai compressori d’aria ai gruppi frigoriferi, dai miscelatori ai trasportatori, ma la lista è interminabile in quanto nella maggior parte delle applicazioni tecnologiche, sia industriali che del terziario, per ricavare energia meccanica dall’energia elettrica si usano proprio questi motori.

Tuttavia i motori asincroni trifasi, quando collegati direttamente alla rete, hanno il “difetto” di girare a velocità praticamente costante.

Lo statore di un motore elettrico trifase è la parte fissa nella quale sono inseriti i tre avvolgimenti primari, e ad essi viene applicata la tensione di alimentazione.

All’interno dello statore trova posto il rotore, che trascinato dal campo magnetico degli avvolgimenti statorici si pone in rotazione.

Dato che l'alimentazione è in corrente alternata, e che gli avvolgimenti sono montati sfasati di  $120^\circ$ , il campo magnetico risultante è un Campo Magnetico Rotante, che gira ad una velocità direttamente in proporzione alla frequenza della tensione di alimentazione.

In pratica applicando una tensione a 50 Hz esso compie 50 giri al secondo, ossia 3000 giri al minuto.

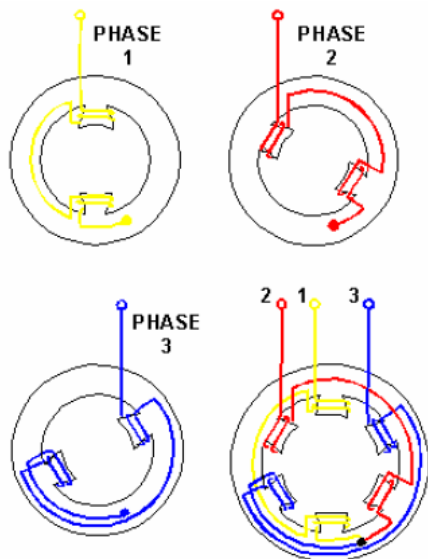


Figura 2.1 - Composizione di un motore ad una coppia polare (ossia con una terna di avvolgimenti trifase)

La tecnologia costruttiva dei motori elettrici permette comunque di costruire motori con più terne di avvolgimenti statorici, così ognuna delle quali forma la cosiddetta Coppia Polare ( o due poli).

Quando lo statore viene costruito con più di una coppia polare il Campo Magnetico Rotante non gira più a 3000 giri al minuto, ma a velocità inferiori, vista la presenza di altri poli magnetici che permettono al rotore di percorrere meno spazio prima di trovare il polo che “lo attrae”.

Da ciò deriva che sono realizzabili motori con diverse velocità, che a 50 Hz significa:

<i>Numero di Poli</i>	<i>Coppie Polari</i>	<i>Velocità (giri/min)</i>
2	1	3000
4	2	1500
6	3	1000
8	4	750
10	5	600
ecc..	..	...

Tipicamente i costruttori hanno a catalogo motori a 2, 4, 6, 8 poli, mentre per modelli con un numero di poli superiore è necessario richiederne la costruzione su misura.

Ricapitolando quindi, nello statore si trovano i due fattori che influiscono nella velocità di rotazione di un motore:

1. la frequenza della tensione di alimentazione;
2. le coppie polari, ossia il numero di terne di avvolgimenti che costituiscono lo statore.

Dato che non è possibile modificare le coppie polari, si deduce che regolare la velocità di un motore trifase è necessario variare la frequenza con cui lo si alimenta.

Per capire meglio un azionamento in corrente alternata è necessario capire le formule base che descrivono il funzionamento del motore trifase. Innanzi tutto vediamo l'aspetto velocità di rotazione.

Come già visto in un motore trifase il rotore è mantenuto in rotazione dal campo magnetico rotante prodotto dalle correnti che circolano negli avvolgimenti trifasi dello statore.

La velocità del campo magnetico rotante è calcolabile con la seguente formula:

$$n_s = \frac{120 * f}{2 p}$$

Dove :  
 $n_s$  = Numero di Giri al Minuto (del campo di statore)  
 $f$  = frequenza di alimentazione  
 $2p$  = Numero di poli che costituiscono il motore

Come già detto in precedenza, visto che le coppie polari sono un fattore costruttivo, l'unico parametro elettrico che può influire sulla velocità del motore è appunto la frequenza.

Detto questo sembrerebbe risolto il problema di come regolare la velocità di un motore elettrico. Basta un dispositivo che alimenti un motore con corrente alternata a frequenza variabile a seconda delle esigenze dell'utente, e questo dispositivo è proprio l'inverter.

Tra l'altro alla luce della formula indicata, nulla toglie alla possibilità di alimentare il motore con una frequenza superiore a quella di targa, per fargli così raggiungere delle velocità più elevate.

Purtroppo però, come si vedrà a breve, ci sono altri parametri elettrici da controllare per mantenere il funzionamento del motore entro le caratteristiche progettuali.

In particolare la frequenza incide notevolmente sulle reattanze e sul flusso magnetico per cui è necessario ricorrere ad alcuni accorgimenti per garantire al motore le prestazioni meccaniche nominali.

In pratica, senza addentrarsi in formule specifiche, se si varia la frequenza con cui si alimenta il motore al fine di modificare la velocità si avrebbe come conseguenza:

3. Per valori inferiori a 50 Hz si ha un aumento del flusso magnetico
4. Per valori superiori a 50 Hz si ha una diminuzione del flusso magnetico

Come già detto, invece, per conservare inalterate le caratteristiche meccaniche del motore, è necessario garantire che il flusso magnetico rimanga più vicino possibile al valore stabilito dal costruttore.

L'unica variabile che può essere usata per risolvere il problema è la tensione, e quindi per concludere, il motore trifase può essere controllato in frequenza a patto che il rapporto V/f (tensione e frequenza) venga mantenuto il più costante possibile, in modo da assicurare che nel motore il flusso magnetico si mantenga nei valori stabiliti dal costruttore.

### **- La regolazione della velocità e funzionamento**

Sapendo che per mantenere costanti le caratteristiche meccaniche di un motore asincrono trifase e soprattutto la coppia è necessario mantenere costante il rapporto tensione e frequenza, se andiamo ad applicare ad un motore una alimentazione con frequenza e tensione ridotte in modo proporzionale tra loro, si ha una diminuzione nella velocità del motore, ma anche il mantenimento della coppia entro lo stesso valore di quella nominale.

Si è però visto che per non modificare le caratteristiche meccaniche del motore è necessario "accompagnare" la variazione della frequenza con la variazione della tensione.

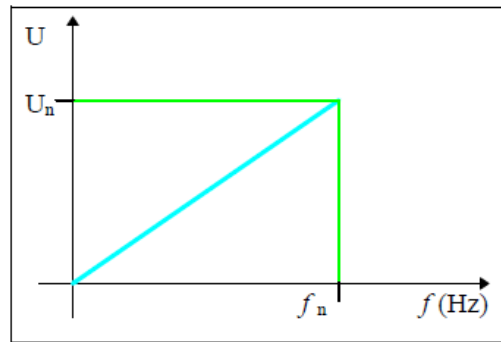
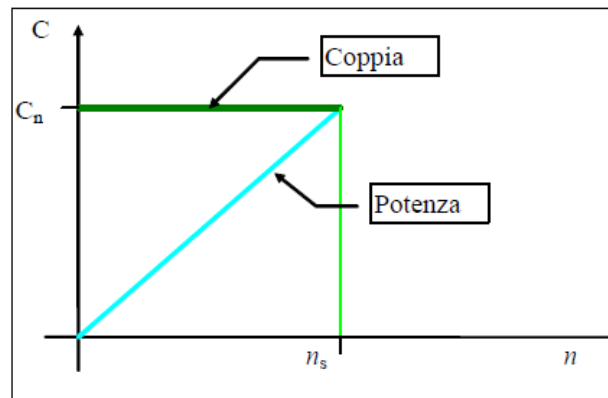


Figura 2.1 Grafico della legge teorica di variazione della tensione in funzione della frequenza.

Ad esempio per ottenere da un motore standard da 5,5 kW a 2 poli, delle diverse velocità di rotazione senza influire nel comportamento della coppia, si dovrà alimentarlo con i seguenti valori di frequenza e tensione:

<i>Frequenza (Hz)</i>	<i>Tensione (V)</i>	<i>Giri / minuto</i>	<i>Coppia (Nm)</i>
50	400	3000	17
40	320	2400	17
30	240	1800	17
25	200	1500	17
20	160	1200	17
10	80	600	17
5	40	300	17

Andiamo a vedere nel grafico sottostante il riepilogo delle variabili discusse:



L'esempio che è stato fatto, però, è puramente matematico e non tiene conto di alcuni effetti, come ad esempio le perdite, che non si comportano in modo propriamente lineare.

Questo tipo di inverter, atto a modificare frequenza e tensione per regolare la velocità del motore ad esso collegato, è definito "scalare".

L'inverter procede quindi a regolare in modo proporzionale frequenza e tensione sulla base del comando esterno impartito dall'utilizzatore del sistema, che in pratica è il comando della velocità richiesta.

Nella realtà l'inverter non aumenta la tensione sempre in modo proporzionale alla frequenza, ma alle basse frequenze tiene la tensione a valori leggermente superiori, per garantire un maggiore

flusso magnetico, per sopperire alle perdite nel ferro.

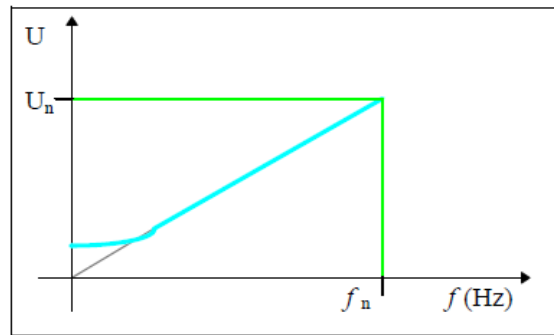


Figura 3.1 Legge di variazione della tensione in funzione della frequenza applicata dalla logica di controllo dell'inverter.

Con l'inverter è possibile, oltre a rallentare il motore rispetto alla velocità di targa, anche accelerare a velocità maggiori generando frequenze maggiori ai 50 Hz.

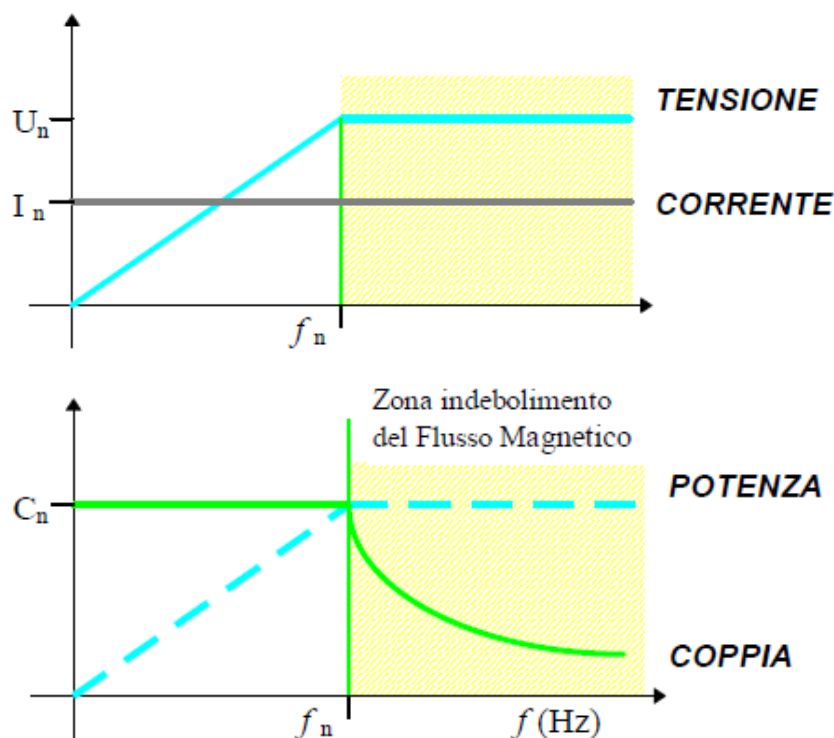
Quando l'inverter raggiunge la frequenza nominale, contemporaneamente raggiunge anche la piena tensione (ossia quella della rete di alimentazione).

Dopo tale punto è ancora possibile aumentare la frequenza per ottenere velocità maggiori, ma non è più possibile aumentare la tensione.

L'inverter infatti non può elevare la tensione ad un valore più alto di quello con cui viene alimentato e anche se fosse possibile aumentare la tensione si danneggerebbe l'isolamento degli avvolgimenti del motore.

Succede quindi che aumentando la frequenza oltre a quella di targa, l'inverter non rispetta più la legge di proporzionalità tra frequenza e tensione, entrando nella zona di indebolimento del flusso magnetico, che comporta per il motore un progressivo calo della coppia motrice (la zona oltre la frequenza nominale è chiamata zona a potenza costante).

I grafici che seguono riassumono l'andamento di tutte le variabili, elettriche e meccaniche, in funzione della frequenza, di un motore asincrono trifase (considerando il motore accoppiato con un carico meccanico che a 50 Hz assorbe la potenza nominale).





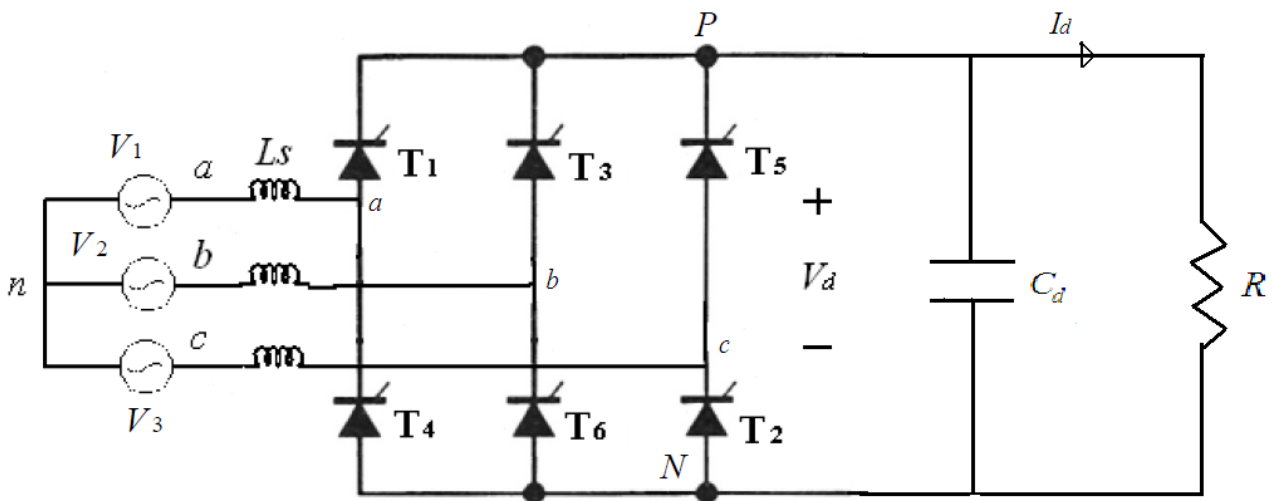
Si deve inoltre tenere conto che a frequenze più elevate del valore di targa le perdite nel ferro aumentano in modo molto marcato.

### - Funzionamento di un raddrizzatore

Il raddrizzatore è un dispositivo elettronico che ha il compito di trasformare una tensione alternata in una tensione continua. Esso è generalmente dotato di un ponte raddrizzatore a diodi e di un circuito di filtraggio costituito da uno o più condensatori in funzione della potenza.

Nelle applicazioni industriali dove sono disponibili tensioni alternate trifasi, è preferibile usare circuiti raddrizzatori trifase, piuttosto che raddrizzatori monofase, grazie al loro basso ripple (cioè fluttuazione della tensione in uscita) nelle forme d'onda e alla loro capacità di trattare potenze più elevate.

Nelle apparati elettrici è comunemente usato un raddrizzatore trifase a sei impulsi, a ponte e con un condensatore di filtro connesso sul lato continua del raddrizzatore come indicato nella figura sottostante.



Il valore della induttanza  $L_s$  sul lato corrente alternata lo poniamo a zero per semplicità e sul lato corrente continua supponiamo che scorra una corrente  $I_d$  costante.

La tensione  $V_{pn}$  è la tensione del punto P riferita al neutro  $n$  del sistema di alimentazione. Analogamente  $V_{Nn}$  è la tensione del terminale negativo N. Poiché  $I_d$  circola con continuità, in ogni istante  $V_{pn}$  e  $V_{Nn}$  possono essere ottenute in funzione di una delle tensioni lato alternata  $V_{an}$ ,  $V_{bn}$  e  $V_{cn}$ . Alla fine abbiamo che per ogni istante la tensione sul lato continua è:

$$V_d = V_{Pn} - V_{Nn}$$

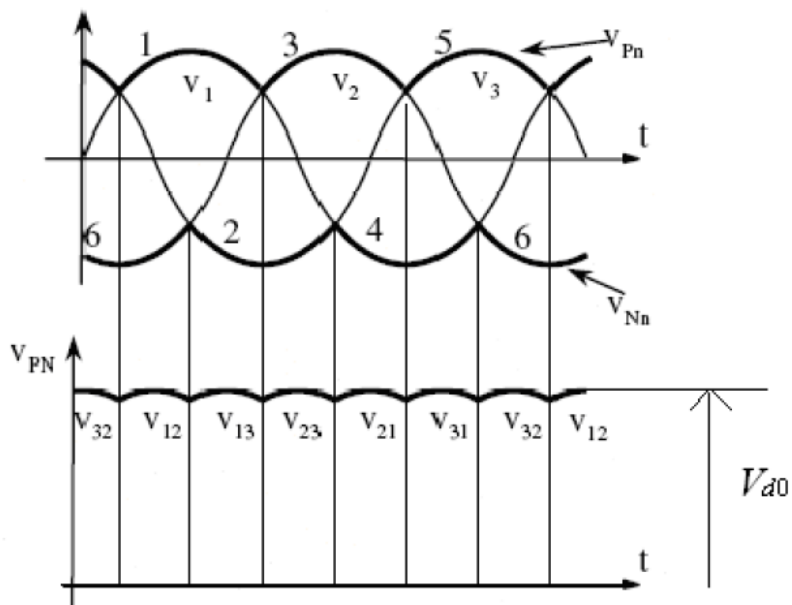
La forma d'onda istantanea di  $V_d$  è composta da sei segmenti per ogni periodo della frequenza di linea. Per questo il raddrizzatore è sovente chiamato raddrizzatore a sei impulsi. Considerando la forma d'onda della fase  $a$  abbiamo che la corrente  $I_a$  è uguale a:

1.  $I_d$  quando conduce il diodo 1
2.  $-I_d$  quando conduce il diodo 4
3. 0 quando non conducono né il diodo 1 né il diodo 4

La forma d'onda risulta essere la seguente:

$$V_{d0} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} * V_{LL} = 1,35 * V_{LL}$$

$V_{LL}$  = valore efficace delle tensioni concatenate



Nel seguente caso abbiamo considerato che l'uso di diodi e quindi conducono per valori di tensioni positive.

Supponiamo ora di usare degli IGBT al posto dei diodi e di dare l'impulso di gate (cioè di funzionamento del IGBT) in un determinato istante periodico  $\alpha$ : nel seguente caso abbiamo che possiamo controllare il valore della tensione in lato continua. L'area  $A_\alpha$ , che compare ogni  $60^\circ$ , comporta una riduzione, rispetto a  $V_{d0}$ , del valore medio della tensione lato continua funzione dell'angolo di ritardo  $\alpha$ . Pertanto abbiamo:

$$V_{d\alpha} = V_{d0} - \frac{A_\alpha}{\pi/3}$$

L'area  $A_\alpha$  è l'integrale di  $V_{an} - V_{cn} = V_{ac}$ . Quindi abbiamo che, con opportuna scelta dell'origine del tempo:

$$v_{ac} = \sqrt{2}V_{LL} \sin \omega t$$

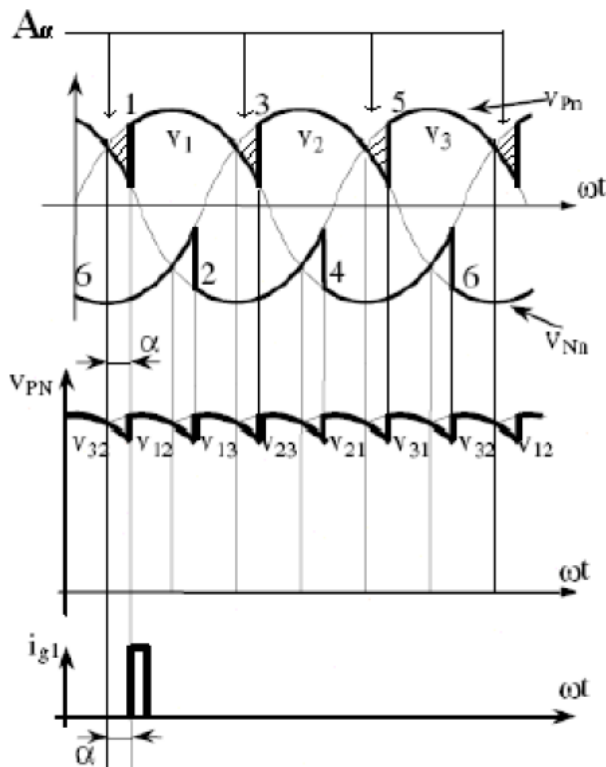
Pertanto si ricava l'area  $A_\alpha$ :

$$A_\alpha = \int_0^\alpha \sqrt{2}V_{LL} \sin \omega t d(\omega t) = \sqrt{2}V_{LL}(1 - \cos \alpha)$$

Alla fine si ottiene che la tensione in uscita è:

$$V_{d\alpha} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{LL} \cos \alpha = 1,35 V_{LL} \cos \alpha = V_{d0} \cos \alpha$$

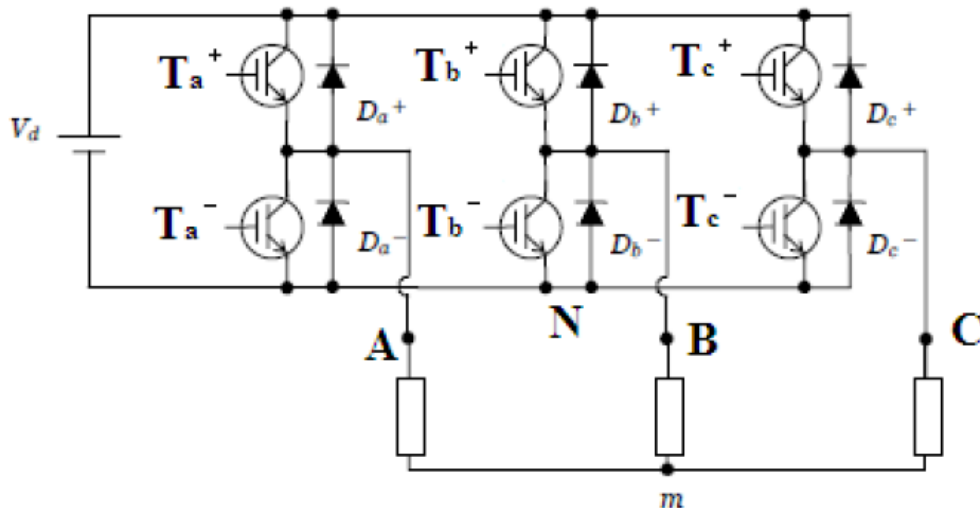
Con il grafico seguente andiamo a vedere l'andamento delle tensioni con l'utilizzo di tiristori applicando l'impulso di gate ad un determinato istante.



**- Funzionamento di un inverter trifase**

L'inverter è un dispositivo elettrico che ha il compito di trasformare la tensione continua all'uscita del raddrizzatore in una tensione alternata, la quale viene controllata in ampiezza e frequenza in base ai valori desiderati.

Un inverter trifase può essere rappresentato graficamente nel seguente modo:



Nei circuiti degli inverter, la modulazione a larghezza d'impulso (PWM), viene eseguita attraverso il confronto di un onda triangolare e un onda sinusoidale con la frequenza desiderata.

La frequenza dell'onda triangolare stabilisce la frequenza di commutazione degli interruttori ed è di solito tenuta costante assieme alla sua ampiezza  $V_{tri}$ . Quest'onda ha una frequenza  $f_s$  e risulta essere la frequenza di commutazione con la quale gli interruttori dell'inverter sono comandati.

Il segnale di controllo  $V_{controllo}$  è usato per modulare il duty cycle dell'interruttore e ha la frequenza  $f_1$ , che è la frequenza desiderata per la prima armonica della tensione dell'uscita dell'inverter. La tensione d'uscita dell'inverter non è un'onda sinusoidale perfetta ma contiene delle armoniche a frequenze multiple di  $f_1$ . Il rapporto di modulazione d'ampiezza  $m_a$  è definito come:

$$m_a = \frac{\hat{V}_{controllo}}{\hat{V}_{tri}}$$

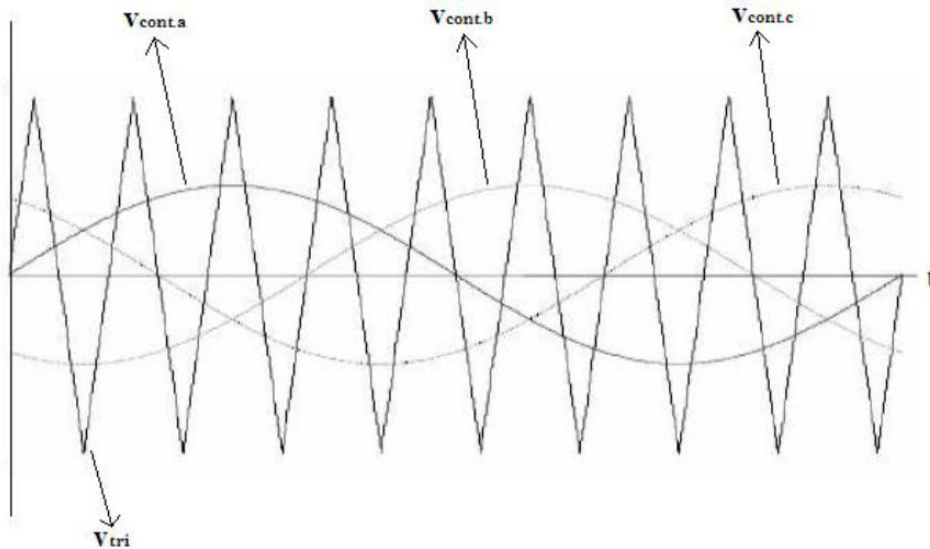
i due valori di tensione di controllo e quella triangolare sono riferiti ai massimi. Il rapporto di modulazione  $m_f$  è definito come:

$$m_f = \frac{f_s}{f_1}$$

Occorre discutere anche sulla scelta della frequenza di commutazione e del rapporto  $m_f$  di modulazione di frequenza. In considerazione della relativa facilità con la quale si possono filtrare le armoniche della tensione a frequenze elevate, è desiderabile scegliere una frequenza di commutazione quanto più alta possibile, eccetto che per un significativo svantaggio: le perdite dovute alla commutazione negli interruttori dell'inverter crescono in modo proporzionale alla frequenza di commutazione. Quindi, nella maggior parte delle applicazioni, la frequenza di commutazione è scelta o inferiore a 6 kHz o superiore a 20 kHz per essere più alta di quella udibile. Se la frequenza ottima di commutazione (in riferimento alle prestazioni globali del sistema) risulta essere nell'intervallo di 6-20 kHz, allora gli svantaggi di aumentarla a 20 kHz sono sovente superati dal vantaggio di non sentire rumori con frequenza di commutazione uguale o superiore a 20 kHz. Quindi, in applicazioni tipiche a 50 o 60 Hz, come gli azionamenti dei motori a tensione alternata, il rapporto di modulazione di frequenza deve essere 9 o anche meno per frequenze di commutazione inferiori a 2 kHz. Una buona relazione tra il segnale dell'onda triangolare e quello di controllo è determinata da quanto è grande  $m_f$ . Andiamo a vedere ora cosa succede per i vari valori di  $m_f$  supponendo che  $m_a$  sia minore di 1.

- Con  $m_f < 21$  abbiamo che il segnale dell'onda triangolare e il segnale di controllo sono tra loro sincronizzati (PWM sincro). Questa modulazione PWM sincrona richiede che  $m_f$  sia un numero intero. Il motivo principale dell'utilizzo di questa modulazione è che per quella di tipo asincrono si hanno delle subarmoniche che sono indesiderate nella maggior parte delle applicazioni. Questo richiede che la frequenza della forma d'onda triangolare debba variare con la frequenza desiderata dell'inverter. Per esempio, se la frequenza d'uscita dell'inverter è di 65,42 Hz e  $m_f = 15$ , allora la frequenza dell'onda triangolare deve essere  $15 \times 65,42 = 981,3$  Hz.
- Con  $m_f > 21$  le ampiezze delle subarmoniche dovute ad una PWM asincrona sono piccole per valori elevati di  $m_f$ . Quindi, con un valore elevato di  $m_f$  la modulazione PWM asincrona può essere usata quando la frequenza dell'onda triangolare è tenuta costante, mentre varia la frequenza di controllo e si hanno, quindi, valori non interi di  $m_f$ . Tuttavia, se l'inverter alimenta un carico come un motore a corrente alternata, le subarmoniche con frequenza nulla o vicina allo zero, anche se di piccola ampiezza, producono una corrente elevata che è assai indesiderata. Per tale motivo, la modulazione PWM asincrona dovrebbe essere evitata.
- Con  $m_a > 1$  abbiamo una sovr modulazione la quale genera una tensione d'uscita che contiene molte armoniche rispetto alla zona lineare con  $m_a < 1$ .

Andiamo ora a mostrare un grafico che rappresenta il confronto tra un'onda triangolare e le tre tensioni di controllo sinusoidali sfasate tra di loro di  $120^\circ$  per avere in uscita tensioni trifasi equilibrate:

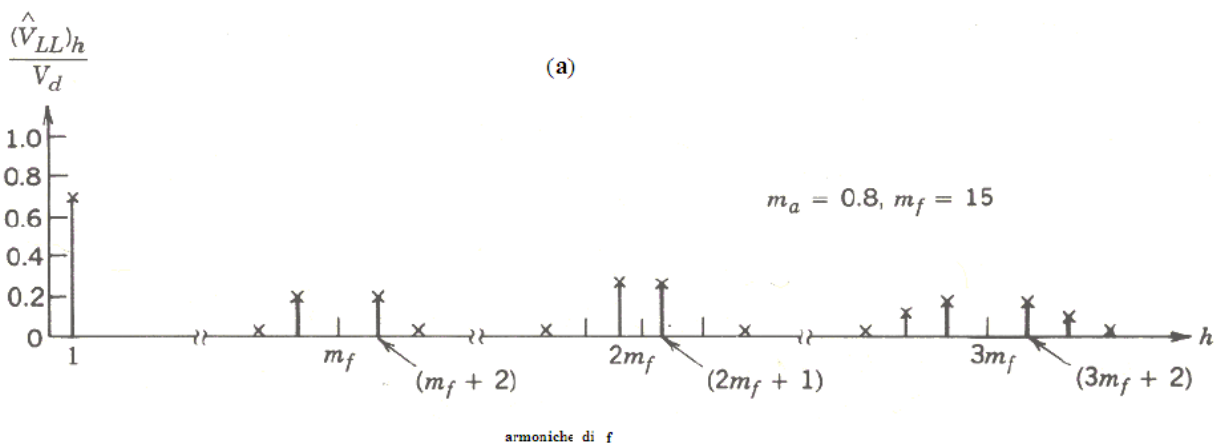


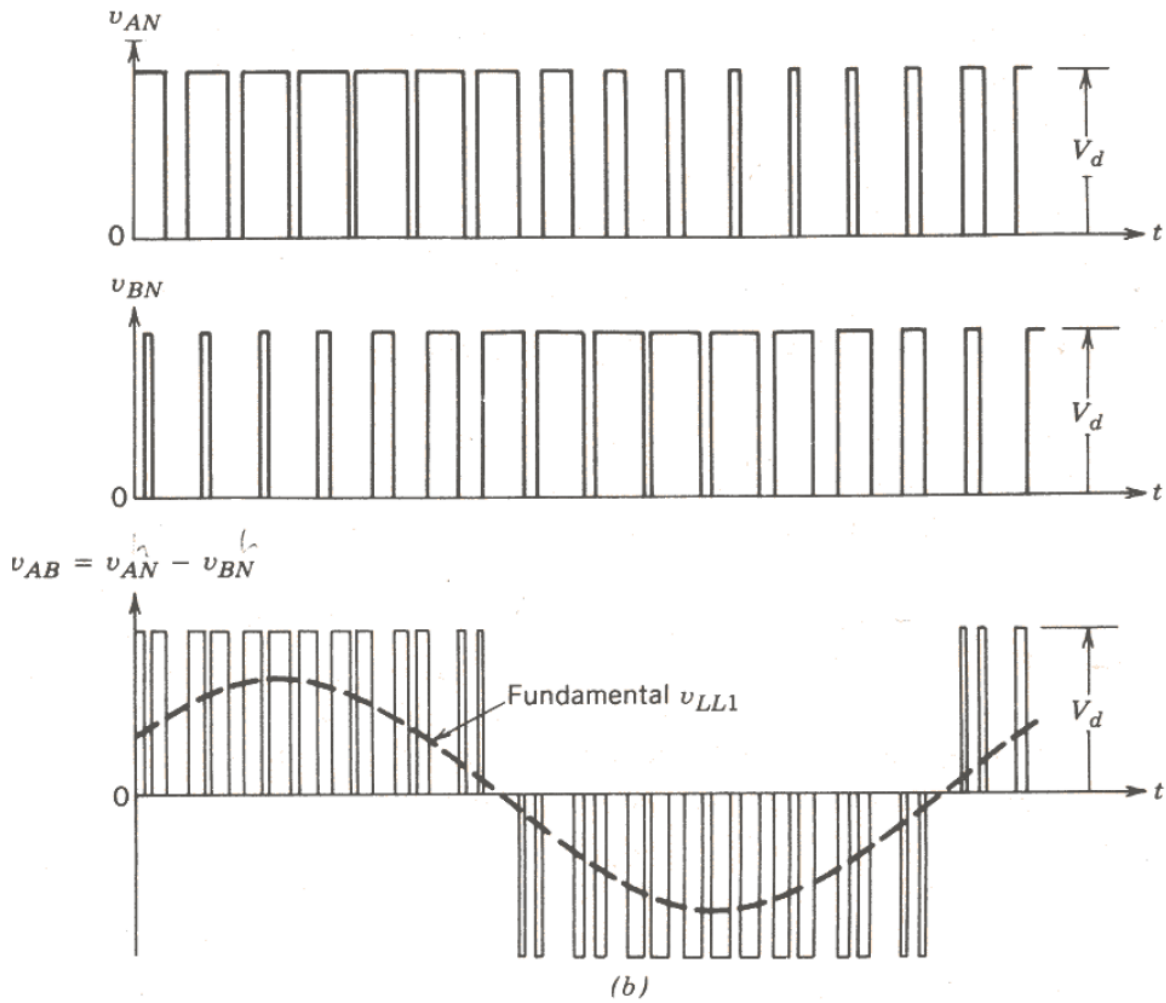
Negli inverter trifase interessano solo le armoniche nelle tensioni concatenate. Le armoniche delle tensioni di ciascuno dei rami, per esempio  $v_{an}$ , sono identiche a quelle di  $v_{ao}$  dove esistono solo le armoniche dispari che son disposte in bande centrate attorno a  $mf$  e ai suoi multipli, purché  $mf$  sia dispari.

Considerando solo l'armonica a  $mf$ , lo sfasamento tra l'armonica  $mf$  di  $V_{AN}$  e quella di  $V_{BN}$  è uguale a  $120 \cdot mf$  gradi. Questo sfasamento è uguale a zero se  $mf$  è dispari ed è un multiplo di tre. Come conseguenza, è nulla l'armonica a  $mf$  nella tensione concatenata  $V_{AB}$ . La stessa considerazione è valida per la soppressione delle armoniche che sono multipli dispari di  $mf$  se per  $mf$  è scelto un numero dispari multiplo di tre.

Così, alcune delle armoniche dominanti in un inverter ad un solo ramo possono essere eliminate dalla tensione concatenata di un inverter trifase.

Andiamo ora a rappresentare graficamente lo spettro delle armoniche di un inverter trifase (grafico a) e la tensione d'uscita  $V_{AB}$  (grafico b):





Nella zona lineare, cioè con  $m_a < 1$ , la prima armonica della tensione d'uscita varia in modo lineare con il rapporto  $m_a$  di modulazione d'ampiezza. Dalle figure precedenti vediamo che il valore massimo della prima armonica in uno dei rami dell'inverter è:

$$(\hat{V}_{AN})_1 = m_a \frac{V_d}{2}$$

Quindi, il valore efficace della tensione concatenata alla frequenza fondamentale, dovuto ad uno sfasamento di  $120^\circ$  tra le tensioni di fase, può essere scritto come:

$$V_{LL1(\text{concatenata}, \text{rms})} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} (\hat{V}_{AN})_1 = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} m_a V_d \approx 0,612 m_a V_d$$

## CAPITOLO 4: I MOTORI BRUSHLESS

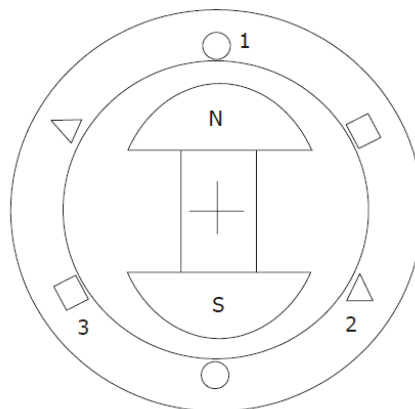
I motori a corrente continua presentano il vantaggio di poter essere facilmente regolati in velocità per mezzo della variazione della tensione applicata ai loro morsetti; d'altra parte la presenza del contatto strisciante fra spazzola e collettore può essere fonte di inconvenienti, che in alcune applicazioni non possono essere accettati.

Fra tali inconvenienti vi sono:

1. i radio disturbi prodotti dallo scintillio che si propagano nell' ambiente circostante sia sotto forme di onde elettromagnetiche che sotto forma di alte frequenze condotte dai cavi di alimentazione.
2. il consumo delle spazzole che richiede la loro sostituzione periodica. Questa operazione è spesso scomoda e talvolta impossibile se il motore si trova all'interno di apparecchiature chiuse.
3. l'usura del collettore che peggiora progressivamente la qualità dei contatti striscianti. Nelle macchine di grande potenza si prevede una nuova tornitura del collettore dopo alcuni anni di funzionamento, mentre nelle piccole macchine questa operazione non è prevista ed il degrado del collettore coincide con la fine della vita operativa del motore stesso.
4. la produzione di polverino, costituito da particelle di polvere di graffite e di rame ossidato, che può creare problemi in apparecchiature sofisticate.

Per conservare i vantaggi del motore a corrente continua e per evitare gli inconvenienti dovuti alla presenza delle spazzole, viene utilizzato il *motore Brushless* cioè un motore senza spazzole.

Il motore brushless è costituito da un rotore su cui alloggiato dei magneti permanenti (è il circuito induttore) e da uno statore su cui sono disposte, ad esempio, tre fasi (è il circuito di indotto) come nella figura sottostante.



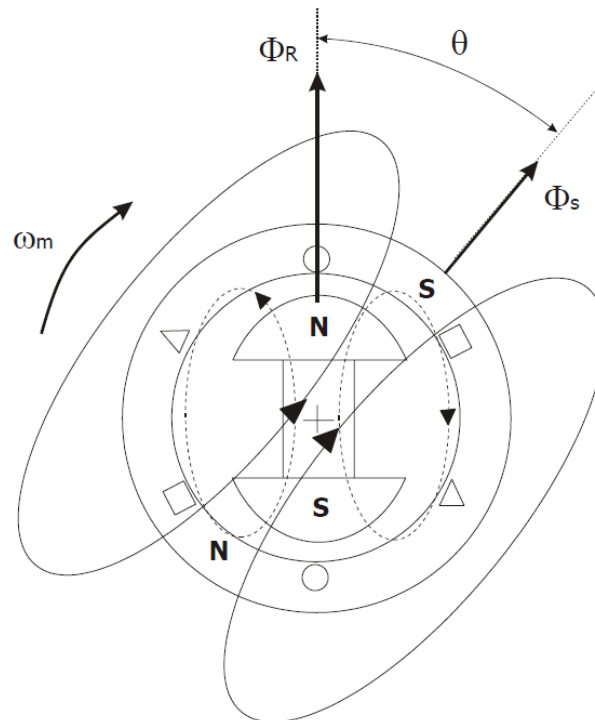
Motore Brushless.

Se si alimentano le tre fasi di statore con tre correnti alternate di frequenza  $f$ , opportunamente sfasate, si avrà in ogni avvolgimento un campo magnetico alternativo. La risultante dei tre campi sarà un campo magnetico costante in modulo e ruotante con una velocità angolare:

$$\omega_{mecc} = \frac{\omega}{p}$$

$p$  = numero di coppie polari

Quindi se si fotografa la situazione in un certo istante, si avrà la seguente disposizione del campo magnetico statorico  $\Phi_S$ .



Posizione relativa dei campi magnetici di statore e di rotore.

Si possono individuare i due poli magnetici del campo di statore (si assume per ipotesi  $p=1$ ):

- il Nord (N) è la regione dello statore da dove escono le linee di flusso;
- il Sud (S) è la regione dello statore da dove entrano le linee del flusso magnetico.

Poiché sul rotore si ha un bipolo magnetico (N-S), i due campi magnetici (di statore e di rotore) interagiscono: si creano così delle forze di attrazione tra i poli di segno opposto ( $N_{\text{statore}} - S_{\text{rotore}}$  e  $S_{\text{statore}} - N_{\text{rotore}}$ ). Il rotore viene allora ad essere soggetto ad una coppia (di natura elettrica) che è espressa dalla relazione:

$$C_m = \Phi_S \Phi_R \sin \theta$$

dove  $\Phi_S$  = intensità del flusso di statore e  $\Phi_R$  = intensità del flusso di rotore e  $\theta$  è l'angolo compreso tra le direzioni medie dei due campi.

Per effetto di tale coppia il rotore tenderà a ruotare con una certa velocità angolare ( $\omega_m$ ) in modo da raggiungere l'allineamento tra i due campi.

Dalla formula qui sopra si osserva che la coppia è massima quando i due campi magnetici sono ortogonali fra loro e nulla quando questi sono allineati.

Quindi per mantenere il rotore in rotazione è necessario che il campo magnetico di statore sia sempre sfasato (la condizione ottima è che siano ortogonali) rispetto a quello di rotore.

È chiaro che, per mantenere lo sfasamento mentre la macchina ruota, occorrerà commutare la corrente negli avvolgimenti di statore, in modo dipendente dalla posizione del rotore: quindi a monte ci dovrà essere un inverter, comandato da un segnale che rileva la posizione rotorica (ad esempio un encoder). Questo inverter è un convertitore statico che deve trasformare una tensione continua in tre tensioni alternate di cui è possibile regolare la frequenza e l'ampiezza. In questo caso



l'inverter ha la stessa funzione che aveva il sistema spazzole-collettore nel motore in continua: da ciò nasce il nome di motore in corrente continua senza spazzole.

In un certo senso è una macchina sincrona, perché i campi di rotore e di statore sono sempre mantenuti sincroni e sfasati tra loro per creare la coppia motrice.

Lo schema di base di un azionamento brushless (vedi figura sottostante) consiste di un motore sincrono a magneti permanenti, un convertitore statico (in questo caso un convertitore bistadio costituito da un ponte raddrizzatore a diodi e da un inverter), un sensore di posizione ed un dispositivo di controllo che opera basandosi sulle informazioni fornite dal sensore.

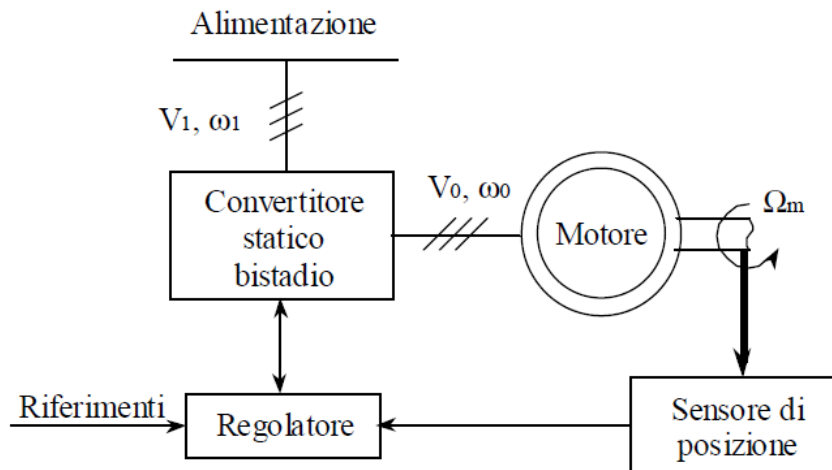


Figura 1.1: Schema di un azionamento brushless

Nel campo degli azionamenti per macchine utensili una distinzione che viene solitamente introdotta è quella tra assi e mandrini indicando con i primi quegli azionamenti destinati esclusivamente ai moti di avanzamento, con i secondi quelli responsabili dei moti di lavoro dell'utensile o del pezzo a seconda del tipo di macchina.

Si passa quindi ad analizzare brevemente i requisiti di un azionamento asse: il suo compito è essenzialmente quello di portare in rotazione un albero ad una determinata velocità, imposta da un opportuno riferimento, indipendentemente, entro determinati limiti, dalla coppia resistente e quindi dalla coppia motrice erogata dal motore: questo compito deve essere svolto rispettando alcuni importanti requisiti:

1. totale bi direzionalità dell'azionamento con zona morta praticamente nulla intorno allo zero di velocità, sia in condizioni statiche che dinamiche
2. il rapporto tra velocità massima e minima regolabile deve essere indicativamente maggiore di 10 con coppia nominale e, passando da vuoto a carico nominale, la velocità non deve diminuire più di 1/10 della velocità massima.

Tali caratteristiche possono essere riassunte dicendo che l'azionamento deve possedere una elevata rigidità statica, intendendo per rigidità statica appunto il rapporto tra coppia esterna applicata e variazione di velocità da essa prodotta.

Altro elemento fondamentale di giudizio tecnico è la banda passante dell'anello di velocità: per un'asse di elevate prestazioni è richiesto che la banda passante in fase non sia inferiore ai 40 Hz (cioè la frequenza alla quale lo sfasamento supera i 45°, sia superiore ai 40 Hz) mentre in ampiezza (frequenza in corrispondenza della quale si ha un'attenuazione di 3 dB) non sia inferiore ai 70 Hz.

Tali caratteristiche, valide nel funzionamento attorno allo zero di velocità, devono mantenersi entro un margine del 20% rispetto a quanto definito sopra anche in condizioni di lavoro con "carico

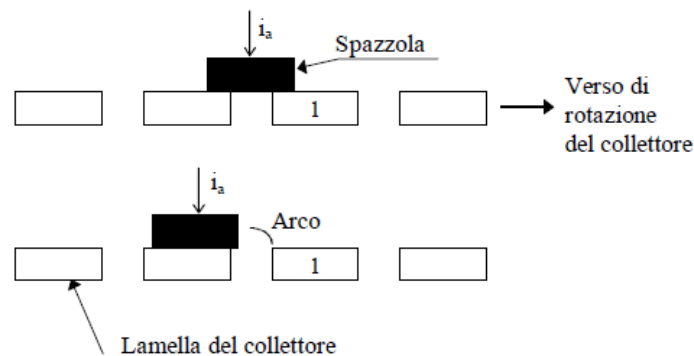
inerziale” (inteso convenzionalmente come un carico pari alla metà dell’inerzia del motore) o con un “carico di coppia nominale” (convenzionalmente definito come una coppia pari alla metà di quella nominale). L’ampiezza della banda passante dell’anello di velocità può dunque essere assunta come indice della rigidità dinamica dell’azionamento.

Infine l’accelerazione fornita dal motore in presenza di un carico inerziale o di coppia definiti come sopra deve essere elevata, indicativamente dell’ordine dei 100 rad/s al quadrato; per conto le velocità massime richieste non sono in genere molto elevate, aggirandosi attorno ai 200 rad/s.

Lo scopo di questi requisiti, peraltro strettamente correlati fra loro, è quello di poter ottenere, con l’ausilio di catene cinematiche rigide, un controllo di posizione particolarmente accurato al fine di raggiungere elevati gradi di finitura del pezzo in lavorazione.

Riassumendo i principali vantaggi di un motore brushless sono:

- Il campo di rotore si deve ad un magnete permanente, quindi nel rotore non ci saranno perdite apprezzabili. Le uniche perdite saranno nello statore.
- Si evita il sistema spazzole-collettore con notevoli vantaggi. Infatti nel motore in continua il problema di ottenere alte coppie in velocità (esempio robot che solleva o sposta un pezzo) è male affrontato, perché lo scorrimento delle spazzole sulle lamelle del collettore porta, per fenomeni induttivi, al mantenimento di archi elettrici che saranno sempre più intensi quanto più elevata è la corrente (alte coppie) e quanto più cresce la velocità.



Spostamento del contatto spazzola-collettore durante il moto

Spesso un robot industriale deve compiere un ciclo di lavoro ripetitivo: ad esempio lo spostamento di un pezzo da un banco di lavoro a un altro. In tal caso il motore compie sempre lo stesso numero di giri a carico, abbandona il pezzo trasportato, si riposiziona e riprende un nuovo pezzo. Ci sarà perciò uno scintillio dovuto a una sovracorrente per ogni presa di carico e sempre sulla stessa lamella: quindi un’usura più rapida del collettore rispetto al caso di un ciclo di lavoro non ripetitivo. È il motivo che ha portato a una delle prime applicazioni industriali del motore brushless nelle macchine transfert sulle linee di produzione della Fiat Uno.

L’assenza di spazzole è quindi vantaggiosa non solo per problemi di manutenzione e di usura, ma anche perché elimina un sistema pesante, ingombrante e costoso.

- Problemi di peso ed inerzia: il motore brushless ha rotori molto leggeri (a volte cavi) e i magneti (in Samario-Cobalto o in Neodimio-Ferro-Boro) sono incollati solo su di uno strato sottile superficiale. Ciò riduce di molto il peso ed anche il momento di inerzia del motore.

Gli svantaggi del motore brushless sono:

- Necessità dell’inverter: al costo del motore va aggiunto quello di un inverter, sensori e sistema di controllo.
- Presenza di magneti permanenti del tipo a terre rare, con elevati costi.

Con la seguente tabella andiamo ad effettuare un confronto tra un motore brushless ed un motore in corrente continua:

<b>Caratteristiche</b>	<b>Motore brushless</b>	<b>Motore CC</b>
<b>Vita</b>	<i>Vita dei cuscinetti</i> 20000 ore o più	<i>Vita delle spazzole</i> Dalle 3000 alle 5000 ore Variabile dalle condizioni del carico e ambientali
<b>Manutenzione</b>	<i>Non è richiesta</i> Non vi sono contatti meccanici	<i>Richiesta</i> Manutenzione periodica e sostituzione delle spazzole
<b>Rumore sonoro</b>	<i>Basso</i>	<i>Medio-alto</i> Dovuto al contatto delle spazzole
<b>Rumore elettrico</b>	<i>Molto basso</i> Commutazione ponti a semiconduttore	<i>Presente</i> Rumore dovuto all'azione delle spazzole
<b>Efficienza</b>	<i>Ottima</i> Buona dissipazione del calore direttamente dallo statore	<i>Buona</i> Perdite elettriche dovute al riscaldamento del rotore dove sono presenti gli avvolgimenti
<b>Risposta al sovraccarico</b>	<i>Buona</i> Ampia costante di tempo termica Elevata velocità e alta coppia Limite di corrente nei ponti a semiconduttori	<i>Media</i> Bassa costante di tempo termica Limite di corrente sulle spazzole a causa della commutazione
<b>Caratteristiche di risposta</b>	<i>Molto veloci</i>	<i>Veloci</i>
<b>Pulizia ambientale</b>	<i>Non richiesta</i>	<i>Richiesta</i> La polvere si deposita sulle spazzole



## CAPITOLO 5: RISPARMIO ENERGETICO SUL CICLO FRIGORIFERO.

### - Il ciclo frigorifero

I cicli frigoriferi sono trasformazioni termodinamiche cicliche che avvengono in particolari macchine chiamate “macchine inverse”, in quanto in queste macchine il lavoro viene sfruttato invece di essere prodotto.

Una macchina inversa, detta anche macchina frigorifera, può essere schematizzata nel seguente modo:

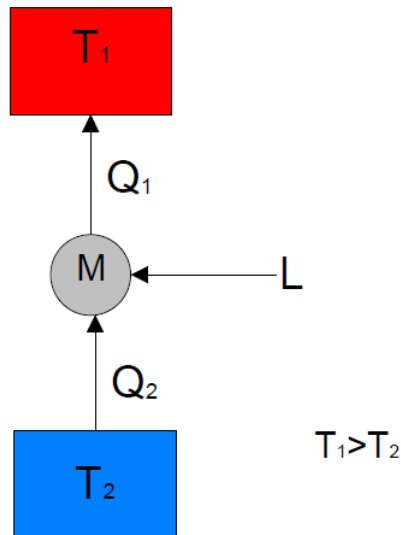


Figura 1 : Schema a blocchi di una macchina frigorifera

Le macchine frigorifere possono essere utilizzate principalmente per due scopi differenti:

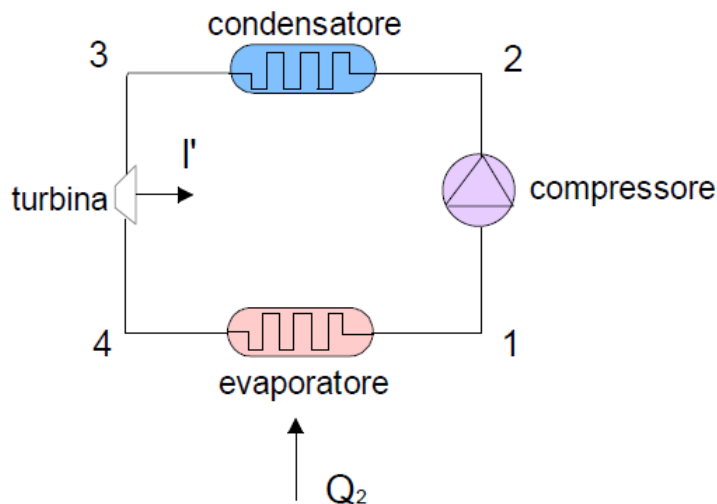
- mantenere freddo il serbatoio a temperatura inferiore  $T_2$  (esempio il frigorifero di casa);
- fornire calore al serbatoio a temperatura superiore  $T_1$  (esempio le pompe di calore);

Nel primo caso, come si può ben vedere dalla figura precedente, la macchina mantiene la temperatura  $T_2$  costante (in teoria) assorbendo il calore  $Q_2$ , inoltre cede il calore  $Q_1$  al serbatoio a temperatura  $T_1$ , che di solito è rappresentato dall'ambiente esterno. È per questo motivo che un normale frigorifero, durante il suo funzionamento, emette calore nell'ambiente attraverso una serpentina che funziona come una vera e propria stufetta.

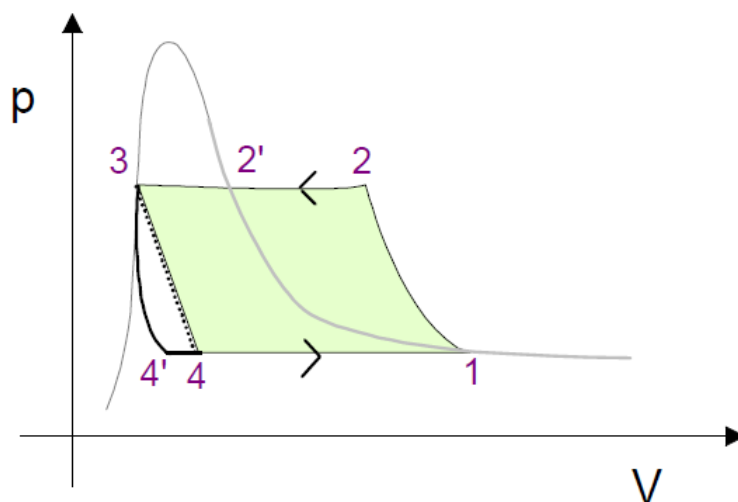
Nel secondo caso invece quello che interessa è il calore  $Q_1$  che la macchina è in grado fornire al serbatoio a temperatura  $T_1$ , ossia lo scopo è il riscaldamento di un ambiente come ad esempio un appartamento. Questo può avvenire assorbendo il calore  $Q_2$  da un serbatoio che in questo caso viene rappresentato dall'ambiente esterno, inoltre è necessario utilizzare il lavoro  $L$ .

Osservando il funzionamento di una macchina frigorifera si può notare che essa non è molto diversa da una macchina a ciclo Rankine, che può essere considerata la rispettiva macchina diretta.

Nella figura sottostante è rappresentato uno schema di un impianto frigorifero e come si può vedere la macchina inversa è composta dagli stessi elementi della macchina diretta, anche se la turbina in questo caso può essere sostituita da una valvola di laminazione. Infatti il lavoro prodotto dalla turbina risulta essere molto piccolo, così non viene più recuperato, allora si preferisce utilizzare una valvola di laminazione che ha un costo inferiore. Queste somiglianze si ritrovano anche nelle particolari trasformazioni che subisce il fluido all'interno della macchina, infatti una macchina inversa utilizza un ciclo Rankine percorso appunto in senso inverso.



Studiamo ora nel dettaglio i vari passaggi del ciclo frigorifero dandone una rappresentazione sul diagramma p-v:



- Fase 1-2: il fluido, che in 1 si trova allo stato di vapore saturo secco, passa attraverso un compressore che ne aumenta la pressione per mezzo di una trasformazione adiabatica reversibile. Durante questo passaggio si verifica un aumento significativo della temperatura del fluido, che in 2 si trova nel campo del vapore surriscaldato.
- Fase 2-2' e 2'-3: il fluido percorre la serpentina del condensatore e cedendo calore  $Q_1$  comincia a raffreddarsi a pressione costante, fino a raggiungere in 2' lo stato di vapore saturo secco; a questo punto, sempre a pressione costante, il vapore comincia a condensare e a temperatura costante giunge a 3, che si trova sulla curva limite inferiore.
- Fase 3-4: il fluido entra nella valvola di laminazione e subisce una trasformazione isoentalpica ( $h_3=h_4$ ) che ne diminuisce la pressione e la temperatura e ne aumenta il volume. L'uso della valvola fa sì che questa trasformazione non sia più adiabatica reversibile come nel caso della turbina (3-4'), anzi, la valvola rende questo processo fortemente irreversibile e da ciò deriva l'impossibilità di tracciare un percorso definito da 3 a 4. Altrettanto indefinita risulta essere l'area del ciclo frigorifero, e questo rappresenta uno svantaggio rilevante.
- Fase 4-1: il fluido, che in 4 è quasi completamente liquido, entra nell'evaporatore e a pressione costante comincia la vaporizzazione assorbendo il calore  $Q_2$  fornito dal sistema, fino a raggiungere lo stato iniziale 1 nel quale può ricominciare il ciclo.

## - L'utilizzo dell'inverter negli impianti frigoriferi

Negli ultimi anni, il concetto di risparmio energetico sta diventando di fondamentale importanza nella scelta, da parte del consumatore, di impianti tecnologici atti alla produzione di caldo (pompe di calore) o freddo (condizionatori o gruppi frigoriferi). Questa tendenza ha non solo risvolti economici in termini di riduzione dei consumi di esercizio, ma anche vantaggi ecologici per via delle minori emissioni di CO<sub>2</sub>.

Un parametro fondamentale per valutare l'efficienza di un'unità moto condensante è il COP (coefficiente di prestazione), definito come il rapporto tra la potenza resa e quella impiegata per produrla; risulta essere funzione del compressore e del condensatore. Per migliorare le prestazioni di una macchina frigorifera si deve, pertanto, cercare di ottimizzare il funzionamento di entrambi questi componenti.

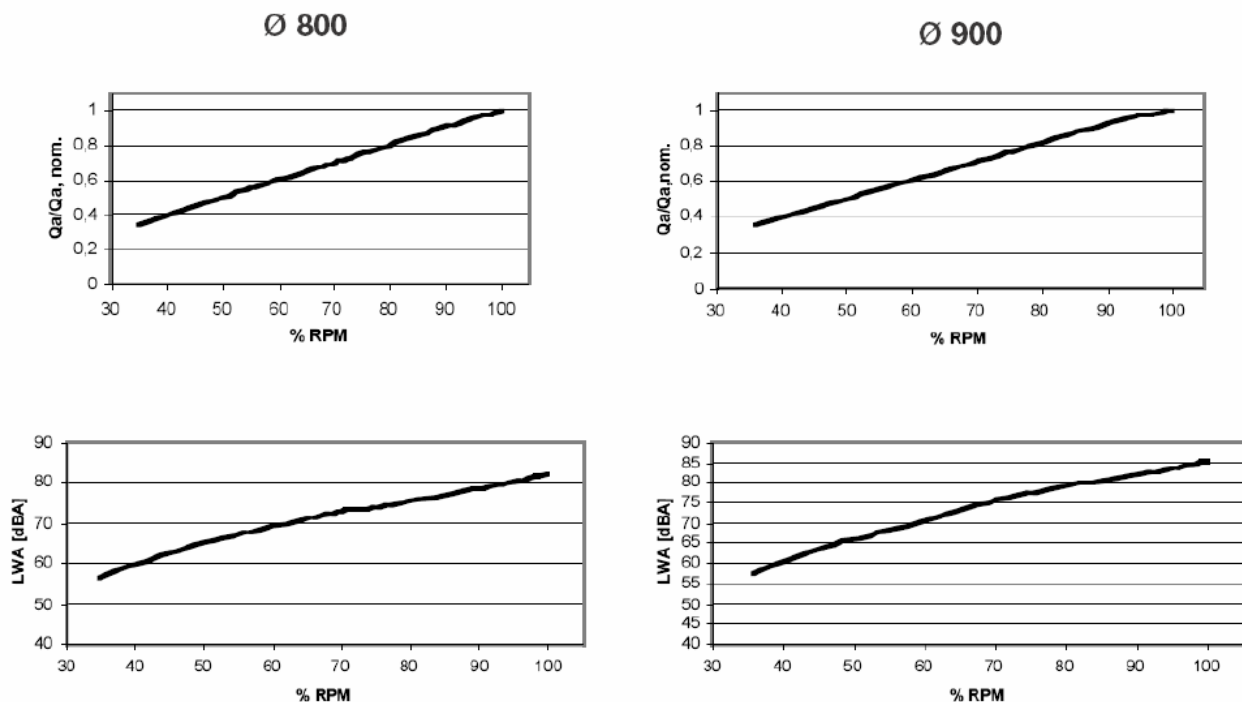
L'inverter è uno degli ultimi accorgimenti adottati dalla tecnologia in questo ambito. Questo componente elettronico ci permette di variare la velocità di un motore elettrico attraverso la modulazione della frequenza e della tensione di alimentazione.

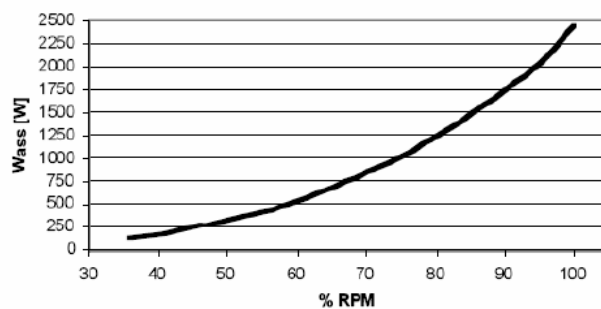
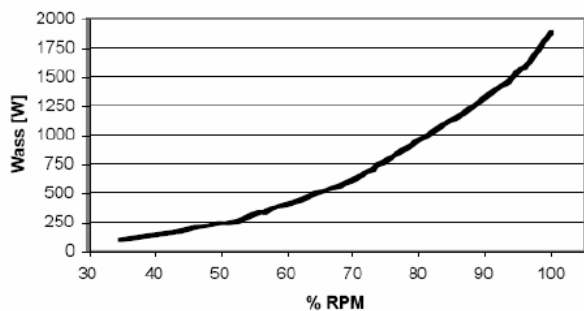
Questi dispositivi si possono applicare, nel caso di una macchina frigorifera, sia ai compressori che alle ventole del condensatore e rendono possibile ottenere un importante risparmio energetico.

L'inverter nei ventilatori dei condensatori: per i condensatori si parla più propriamente di ventilatori elettronici a velocità variabile (EC motors). In questo caso non viene variata la frequenza (come sugli inverter dei compressori), ma si trasforma la corrente alternata che alimenta il ventilatore in corrente continua; questa viene poi modificata in impulsi che alimentano il motore elettrico.

L'applicazione di tale tecnologia ha molteplici vantaggi, sia di natura energetica (minor consumo) che di migliore gestione dell'impianto.

Per meglio comprendere quanto verrà esposto qui di seguito, si riportano le curve caratteristiche di un ventilatore diametro 800 mm e uno di diametro 900 mm.





I grafici descrivono la portata d'aria, potenza sonora e potenza assorbita in funzione della velocità di rotazione.

Già a prima vista si può notare che, diminuendo la portata di aria elaborata del 50%, la potenza sonora del ventilatore diminuisce di circa 20 dB(A) e la potenza assorbita cala del 80-85%.

La modulazione della portata di aria, in funzione del reale carico frigorifero e delle condizioni esterne ambientali, consente di ottimizzare il funzionamento del condensatore senza i picchi della temperatura di condensazione tipica degli impianti con ventilatori classici. Infatti, nel caso di un condensatore senza regolazione della velocità, le accensioni delle ventole vengono gestite con una semplice parzializzazione ON-OFF: l'accensione o lo spegnimento vengono regolati tramite un algoritmo che è funzione della pressione di mandata del condensatore e se il ventilatore è in funzione, gira alla sua velocità nominale. In questo modo viene controllato solo il numero delle ventole che devono accendersi, ma non il loro regime di rotazione.

Se invece il condensatore è dotato di EC motors (motori a commutazione elettronica). Il funzionamento e la velocità di rotazione delle ventole vengono gestiti da un algoritmo che è funzione dei dati tecnici del compressore e delle condizioni ambientali di esercizio. Il risultato primario in questo caso non è più quello di mantenere la pressione di mandata entro un certo range, bensì di avere la massima efficienza del sistema compressore-condensatore (COP più elevato possibile). Questo comporta che le ventole si accenderanno tutte alla minima velocità necessaria per smaltire il calore derivante dalla condensazione del gas refrigerante in modo che il rapporto tra la potenza frigorifera resa (funzione del compressore frigorifero) e il consumo di energia elettrica (funzione del compressore e dei ventilatori del condensatore) sia il più elevato possibile: operano perciò secondo le richieste di processo. In questo modo si riesce a sfruttare meglio la batteria alettata, in quanto la totalità della superficie viene investita dal flusso d'aria, cosa che invece non avviene con la parzializzazione ON-OFF.

L'inverter nei compressori: anche per questi componenti l'applicazione dell'inverter comporta vantaggi di natura pratica che di natura energetica. Tra i primi possiamo elencare:

- Il miglioramento dell'efficienza con il controllo del carico elettrico richiesto all'avvio. In questo modo si riescono a ridurre i picchi di assorbimento in accensione visto che, nei compressori tradizionali con avviamento diretto, la corrente di spunto richiesta è pari a circa 5 – 7 volte la corrente nominale del motore.
- L'eliminazione di sequenze ON-OFF visto che, modulando la potenza frigorifera, si riesce a contenere i transitori (accensioni), che rappresentano uno dei momenti più critici per ogni compressore.
- La possibilità, in alcuni momenti, di avere un 20% in più della potenza frigorifera (portando il compressore a funzionare a 60 Hz) per far fronte a carichi frigoriferi particolari.
- La gestione della pressione di aspirazione e, di conseguenza, della temperatura di aspirazione, ottenendone un comportamento molto più regolare evitando i classici picchi tipici delle centrali frigorifere multicompressore quando si inseriscono o disinseriscono i singoli compressori (parzializzazione ON-OFF).



Il vantaggio di natura energetica deriva dalle seguenti considerazioni:

- Si ha una migliore gestione della pressione di aspirazione, facendo in modo di ottenere effettivamente la minima differenza tra la temperatura di evaporazione (in centrale) e la temperatura dell'utenza da raffreddare: più è bassa questa differenza tanto più l'efficienza è alta.
- In abbinamento con l'inverter del ventilatore del condensatore, viene gestito l'intero impianto in modo da ottenere il miglior rendimento possibile (come descritto in precedenza relativamente al COP dell'impianto).
- L'utilizzo dell'inverter nei compressori abbinato all'utilizzo dei ventilatori elettronici può portare ad un risparmio di energia, rispetto ad un analogo impianto tradizionale di potenza equivalente, pari ad almeno un 20-30%.

### - Accorgimenti per il funzionamento dell'impianto refrigerante

Andiamo a dare qualche informazione, in merito alla progettazione e all'installazione di sistemi refrigeranti a basso consumo energetico, in modo tale da ridurre il rischio di danneggiamento dei compressori frigoriferi quando vengono utilizzati a velocità variabili.

Compressore senza inverter: la resa frigorifera di un compressore a pistoni può essere adattata al fabbisogno di raffreddamento dell'installazione attraverso l'installazione di un controllo di capacità (testa parzializzata), il bypass del gas caldo, il controllo della pressione di aspirazione, avviando e fermando i compressori nella centrale o in altri modi.

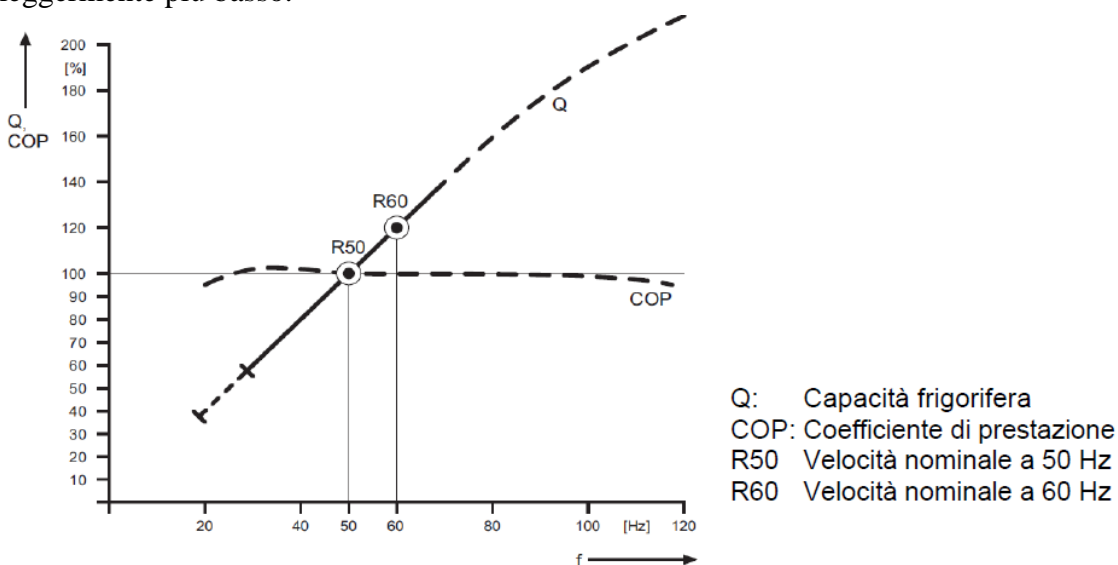
La velocità nominale del compressore dipende dalla frequenza di alimentazione e dal numero di poli del motore. Con un motore a induzione a 4 poli (motore a gabbia di scoiattolo), si avranno le seguenti velocità approssimate del compressore:

- |           |                       |                       |
|-----------|-----------------------|-----------------------|
| - 4 poli: | 1450 giri/min a 50 Hz | 1750 giri/min a 60 Hz |
| - 2 poli: | 2900 giri/min a 50 Hz | 3500 giri/min a 60 Hz |

Compressore con inverter: i compressori a pistoni, a vite e scroll sono delle macchine volumetriche. La coppia resistente media dell'albero del compressore rimane approssimativamente costante su un ampio range di velocità (frequenza). Pertanto, la capacità frigorifera e la potenza elettrica assorbita variano in modo approssimativamente proporzionale alla velocità.

La capacità frigorifera può essere adattata al fabbisogno dell'impianto variando la velocità del compressore con il controllo della frequenza. È possibile un controllo continuo ottimale.

Nei compressori a pistoni, il COP può variare leggermente con la frequenza operativa e la velocità del compressore. A frequenze superiori alla velocità nominale si ha solitamente un COP relativo leggermente più basso.



La figura qui sopra descrive la capacità frigorifera di un tipico compressore volumetrico a pistoni nel range di frequenza ammissibile a condizioni di funzionamento stabili.

- Quando siamo nel funzionamento al di sotto della frequenza nominale, poiché la coppia di un motore elettrico è proporzionale al prodotto di flusso magnetico e corrente interna, è necessario assicurare che il flusso magnetico sia costante. Questo si ottiene selezionando una modalità di controllo con un rapporto tensione/frequenza (V/f) costante nell'inverter. Idealmente, la tensione del motore raggiunge la tensione nominale corrispondente alla tensione dell'alimentazione elettrica alla frequenza nominale. Per i compressori che utilizzano motori standard, questa è:

- 400 V a 50 Hz
- 460/480 V a 60 Hz

Il funzionamento al di sotto della frequenza nominale viene definito funzionamento nella regione del "campo costante", ovvero il flusso magnetico nel motore rimane approssimativamente costante in virtù del rapporto V/f costante.

La frequenza ammissibile minima è limitata dalle seguenti considerazioni:

- Lubrificante
- Portata in massa del refrigerante necessario per un corretto raffreddamento del motore
- Compressori a pistoni: inerzia per assicurare che non vi sia una diminuzione significativa della velocità in corrispondenza del punto morto superiore del pistone; idoneità del supporto del compressore (è spesso necessario un supporto più rigido alla frequenza più bassa)
- Compressori a vite
- Compressori scroll: forze centrifughe radiali, forze del gas, adeguata funzione di tenuta del lubrificante

Quando siamo nel funzionamento al di sopra della frequenza nominale è opportuno informarsi in merito alla massima frequenza ammissibile.

Di seguito vengono illustrati i collegamenti elettrici più comuni usati su motori standard per compressori:

<u>Tensione di alimentazione</u>	<u>Collegamento</u>
- 400 V a 50 Hz / 480 V a 60 Hz:	Tre terminali (la maggior parte dei compressori ermetici).
- 400 V a 50 Hz / 480 V a 60 Hz: 230 V a 50 Hz:	Sei terminali collegati a stella (tensione alta)/ Sei terminali collegati a triangolo (tensione bassa)
- 400 V a 50 Hz / 480 V a 60 Hz:	2 triplette di terminali per la partenza part winding collegate in parallelo alle tre fasi dell'inverter.
- 690 V a 50 Hz / 828 V a 60 Hz: 400 V a 50 Hz / 480 V a 60 Hz:	Sei terminali collegati a stella per l'avviamento/ Sei terminali collegati a triangolo per il normale funzionamento.

Il funzionamento con frequenze superiori, per le tensioni di alimentazione di cui sopra viene definito come funzionamento nella regione di "campo indebolito", ovvero quando il flusso del motore è inferiore al valore ottenibile fino alla frequenza nominale.

In linea generale se viene messa a confronto la tecnologia on-off e quella inverter nel climatizzatore, si può affermare, che conviene sempre un climatizzatore inverter rispetto ad uno on-off.

Nei casi specifici, però, quando si va ad effettuare il dimensionamento di un ambiente bisogna conoscere il differente modo, che hanno di lavorare. Questo per capire la loro diversità di funzionamento a seconda della condizione ambientale, così da poter valutare i casi in cui, una macchina inverter potrebbe rilevarsi non propriamente consigliata.

La leva principale che induce ad acquistare un climatizzatore inverter è il consumo energetico più basso, rispetto ad una macchina on-off. Per conto, ciò che frena l'acquisto è il prezzo più alto, anche se assistiamo ad un restringimento del divario di prezzo che è passato in pochi anni da 200/300 euro e più ad 80/150 euro, chiaramente parliamo di climatizzatori della stessa marca. Più alta invece è la differenza tra un on-off economico (no brand) ed un inverter di marca.

Generalmente, viene consigliato l'impianto di un condizionatore con inverter quando si ritiene di farne un utilizzo continuo, si parla di parecchie ore al giorno, e meglio se per tutti i periodi dell'anno. Questa tendenza generale, considerato l'attuale prezzo d'acquisto di poco superiore ad una macchina on-off, non trova più riscontro favorevole.

Una macchina inverter, nel lasso di poco tempo, raggiunge la temperatura impostata, a questo punto inizia a sfruttare a pieno la sua tecnologia consentendo di far risparmiare fino al 40% di energia elettrica. Più sarà il tempo di utilizzo, maggiore sarà il quantificarsi di tale percentuale in soldi risparmiati.

In pratica se un climatizzatore on-off da 9000 Btu, ha un assorbimento orario di 0,8 kWh, e lo utilizziamo per 5 ore al giorno per 30 giorni all'anno, calcolando il costo di 0,25 €/kWh avremo una spesa di 30 € ( $0,25 \cdot 30 \cdot 0,8$ ). Con un inverter, seguendo la logica generalista del risparmio, spenderemo approssimativamente 18 € [ $30 - (30 \cdot 40 : 100)$ ], risparmiamo il 40%, ovvero 12 €. Se utilizzassimo la macchina inverter per tutto l'anno, lo stesso 40% di denaro diventerebbe un risparmio di 144 €.

Per comprendere meglio la differenza ci soffermiamo, su cosa avviene durante il funzionamento, per quanto riguarda l'assorbimento elettrico. Una macchina on-off accesa assorbe una certa quantità di watt, quando arriva in temperatura stacca portando l'assorbimento a zero. Un inverter ha invece un assorbimento variabile, si adatta alle condizioni ambientali modulando l'assorbimento in un range, che va da un minimo ad un massimo, che va oltre il suo assorbimento nominale.

Per chiarire meglio facciamo un esempio pratico prendendo in riferimento un condizionatore da 9000 Btu e mettiamo a confronto le due tecnologie:

- L'on-off in funzionamento ha un assorbimento di 800 W e raggiunta la temperatura si spegne azzerando l'assorbimento elettrico.
- L'inverter nella fase iniziale ha un assorbimento massimo di 1250 W e man mano che tende a raggiungere la temperatura l'assorbimento diminuisce in modo graduale passando dal nominale di 800 W per poi procedere verso i 750 W ed ancora di meno fino a raggiungere il minimo assorbimento di 400 W. Il valore di assorbimento massimo e minimo, si identifica con il nome di "range" ed è variabile in base al modello di climatizzatore, si possono trovare delle forbici più larghe.

Entrambe i climatizzatori riprendono il loro funzionamento nel momento in cui avvertono un cambiamento di temperatura compreso tra +1 °C e -1 °C.

Considerato il tutto, possiamo affermare in modo definitivo che un climatizzatore inverter è sempre consigliato, sempre che il dimensionamento sia stato fatto in modo corretto.

Infatti c'è un caso in cui l'impianto di un climatizzatore inverter non conviene, e più precisamente, se mettessimo un climatizzatore inverter da 9000 Btu in una stanza di 40 metri quadrati, il climatizzatore lavorerebbe sempre al massimo e non riuscirebbe a raggiungere la temperatura

impostata. In questo caso ci ritroveremmo con un inverter che consumerà più di un climatizzatore on-off.

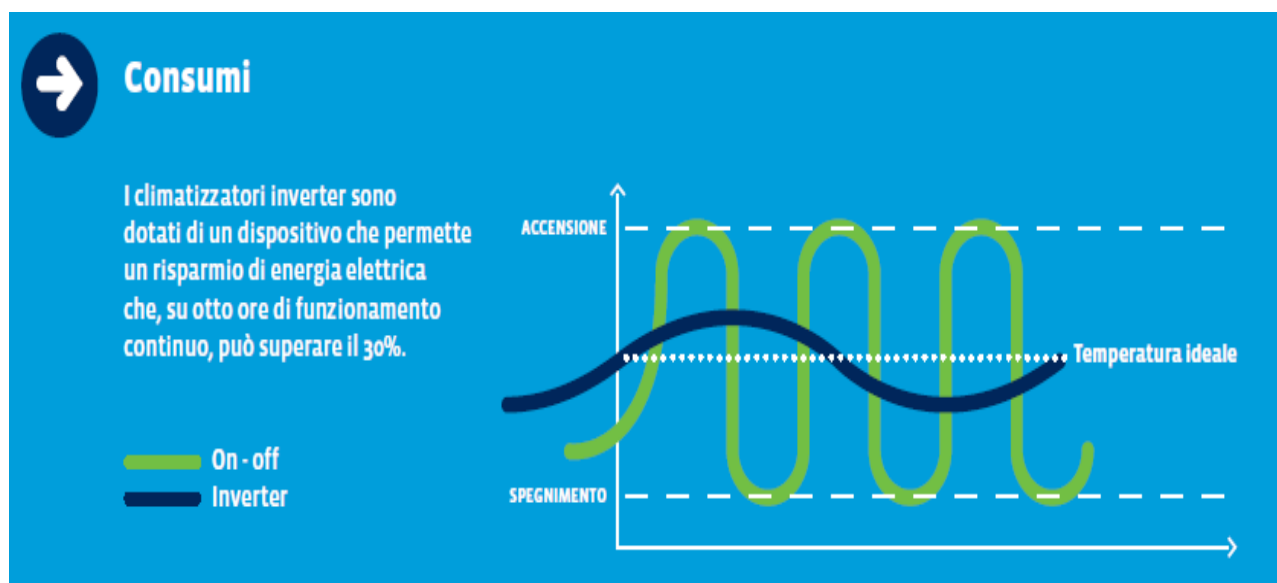
### - Riassunto delle differenze tra un condizionatore on-off e un condizionatore con inverter

Condizionatore on-off:

- Funziona alternando periodi di attivazione della macchina a periodi di disattivazione.
- Quando l'ambiente comincia ad essere troppo freddo, il compressore si arresta con il conseguente rialzo della temperatura. Superata una determinata temperatura il sistema fa ripartire il compressore.
- Questo sistema fa oscillare la temperatura nei locali di circa 2 gradi e fa lievitare i consumi.

Condizionatore con inverter:

- L'inverter è un dispositivo elettronico che permette di variare la potenza della macchina da un minimo ad un massimo eliminando le continue accensioni del motore.
- Il climatizzatore raffredda l'ambiente velocemente spingendo al massimo, modula poi la potenza portandola al minimo per mantenere la temperatura impostata.
- Questo sistema permette un risparmio di energia circa del 30%.
- Garantisce una temperatura costante e maggior silenziosità.

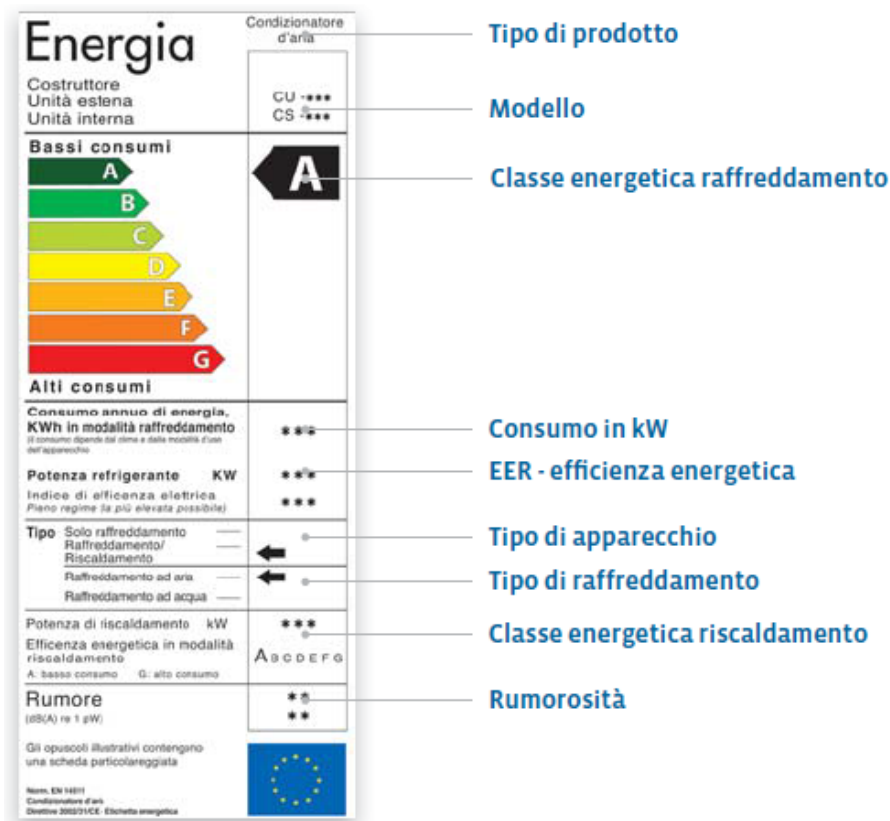


Il consumo annuo è riportato sull'etichetta energetica e si calcola moltiplicando il consumo a pieno carico per 500 ore medie di funzionamento.

L'efficienza dell'apparecchio a freddo è misurata dall'indice di Efficienza Elettrica (EER). Il rendimento della pompa di calore è invece misurato dal coefficiente di resa (COP), dato dal rapporto tra energia resa ed energia elettrica consumata.

In base a questi valori, la classe di efficienza energetica è espressa in una scala che va dalla lettera A alla G: la A indica i consumi più bassi, la G i più alti.

L'acquisto di un apparecchio a basso consumo comporta una spesa iniziale maggiore, che permette però, nel corso degli anni, grandi risparmi sui consumi di elettricità.



La potenza è la capacità dell'apparecchio di rinfrescare. È espressa in Btu/h (British thermal unit e viene utilizzata in Inghilterra e Stati Uniti) o in Watt (1 Watt corrispondente a 3,414 Btu/h). La scelta della potenza di un climatizzatore dipende dal numero di stanze da rinfrescare, dalla loro superficie e forma.

Per un calcolo corretto, vanno considerati anche altri fattori:

- L'esposizione al sole dello stabile
- La capacità isolante dei materiali di costruzione
- Il numero di persone che vivono in casa
- Il piano in cui si trova l'abitazione

## Calcolo della potenza

**A.** Per determinare la **potenza minima necessaria**, consigliamo una potenza di 340 Btu/h per m<sup>2</sup>, considerando un'altezza del soffitto di 2,50 m.

Per un calcolo più approfondito è bene considerare anche altre variabili:

**B.** Se la stanza da climatizzare è **molto soleggiata**, moltiplicare il valore A per 1,3 Btu/h.

**C.** Indicare il **numero di persone** che occupano la stanza, e moltiplicare il numero per 600 Btu/h.

**D.** Se ci sono molte **apparecchiature elettriche** aggiungere 2.000 Btu/h.

**B + C + D = POTENZA TOTALE NECESSARIA (Btu/h)**

$$A \rightarrow \dots \text{ m}^2 \times 340 \text{ Btu/h} = \dots$$

$$B \rightarrow A \times 1,3 \text{ Btu/h} = \dots$$

$$C \rightarrow \dots \times 600 \text{ Btu/h} = \dots$$

$$D \rightarrow \dots + 2000 \text{ Btu/h}$$

$$\text{TOTALE} \rightarrow B + C + D = \dots \text{ Btu/h}$$

Per comprendere meglio il risparmio energetico che si può ottenere con l'utilizzo di un condizionatore, riportiamo due schede tecniche di due differenti condizionatori:

- Split fisso on-off:

<b>SAMSUNG MAX PLUS</b>	<b>COD. 34134940</b>	<b>COD. 33808551</b>	<b>COD. 34134961</b>
Modello	F-AQ09UGFN-1	F-AQ12UGFN-1	F-AQ18UGFN-1
<b>Ambiente consigliato max</b>	<b>25 mq</b>	<b>30 mq</b>	<b>45 mq</b>
Potenza freddo / caldo	9.500 / 9.900 Btu/h	11.844 / 12.968 Btu/h	17.745 / 19.793 Btu/h
Classe freddo / caldo	A / A	A / A	A / B
Consumo freddo / caldo	0,85 / 0,80 kw h	1,09 / 1,05 kw h	1,85 / 1,80 kw h
Dim. unità interna (L×H×P)	820 × 285 × 190 mm	820 × 285 × 190 mm	1065 × 298 × 222 mm
Dim. unità esterna (L×H×P)	660 × 475 × 242 mm	660 × 475 × 242 mm	790 × 548 × 285 mm
Rumorosità u.i.	32 dB(A)	35 dB(A)	40 dB(A)
Gas refrigerante	R410A	R410A	R410A
Tipo filtro	Filtro trattato con argento		
Caratteristiche	Funzione sleep		

- Split fisso con inverter:

<b>SAMSUNG MAX</b>	<b>COD. 33809440</b>	<b>COD. 33809454</b>	<b>COD. 33809461</b>
Modello	F-AQV09UGEN-1	F-AQV12UGEN-1	F-AQV18UGAN-1
<b>Ambiente consigliato max</b>	<b>25 mq</b>	<b>30 mq</b>	<b>45 mq</b>
Potenza freddo / caldo	8.530 / 11.260 Btu/h	11.260 / 13.649 Btu/h	17.061 / 20.473 Btu/h
Classe freddo / caldo	A / A	A / A	A / A
Consumo freddo / caldo	0,73 / 0,91 kw h	1,03 / 1,11 kw h	1,47 / 2,66 kw h
Dim. unità interna (L×H×P)	820 × 285 × 190 mm	820 × 285 × 190 mm	1065 × 298 × 222 mm
Dim. unità esterna (L×H×P)	720 × 548 × 265 mm	720 × 548 × 265 mm	880 × 638 × 310 mm
Rumorosità u.i.	23 dB(A)	23 dB(A)	30 dB(A)
Gas refrigerante	R410A	R410A	R410A
Tipo filtro	Trattato con argento		
Caratteristiche	Funzione good sleep, smart saver, turbo		

Come possiamo notare il condizionatore con utilizzo di inverter tende a consumare meno energia di quello senza inverter.

## - Rumorosità degli impianti frigoriferi

Un problema importante da considerare è il valore della rumorosità prodotta dal compressore di una macchina frigorifera.

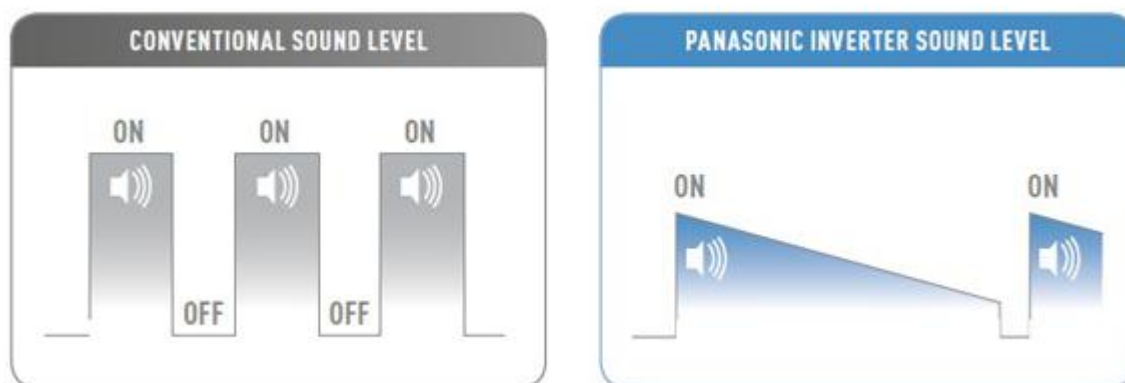
La normativa acustica di riferimento che fissa i limiti dei livelli di rumore negli ambienti abitativi e nell'ambiente esterno è il DPCM 14 novembre 1997 "Determinazione dei valori limite delle sorgenti sonore". Il decreto stabilisce, in attuazione dell'art. 3 della Legge Quadro sull'inquinamento acustico (Legge 447/95), i limiti di emissione e di immissione di rumore, confermando quanto già disposto dal DPCM 1 marzo 1991 per quanto riguarda la suddivisione del territorio in sei classi acusticamente omogenee e per i valori limite di immissione.

I valori limite di immissione, riportati in tabella sottostante, rappresentano i livelli massimi che in una determinata area non debbono essere superati considerando i contributi di tutte le sorgenti sonore.

**Tabella VII:** valori limite assoluti di immissione – Leq in dB(A)

Classi di destinazione d'uso del territorio	Diurno (6-22)	Notturmo (22-6)
I aree particolarmente protette	50	40
II aree prevalentemente residenziali	55	45
III aree di tipo misto	60	50
IV aree di intensa attività umana	65	55
V aree prevalentemente industriali	70	60
VI aree esclusivamente industriali	70	70

Gli impianti di condizionamento moderni, lavorano a livelli di rumorosità molto bassi. La tecnologia inverter in effetti riduce le variazioni de frequenza del rumore, specialmente quando sta lavorando più intensamente.







## **Conclusioni**

Il risparmio energetico risulta al giorno d'oggi uno tra gli obiettivi più importanti da raggiungere a causa dell'aumento progressivo dei consumi di energia.

Prendendo in considerazione l'Italia, la sua dipendenza energetica è fortemente legata a quella estera. Non disponendo in misura significativa di fonti energetiche nazionali, preso atto dell'apporto limitato delle fonti rinnovabili, avendo rinunciato ad un programma nucleare, il nostro paese, per far fronte alla crescente domanda di energia elettrica, è costretto da sempre ad importare quote significative sia di combustibili fossili dalle aree di estrazione sia di energia elettrica dai paesi vicini, evidenziando la sua vulnerabilità a causa delle perduranti oscillazioni del greggio e delle possibili tensioni politiche nei paesi produttori con la conseguente difficoltà di approvvigionamento. Basti pensare che anche i consumi elettrici sono aumentati negli ultimi anni, specialmente in estate, con il rischio che la domanda superi l'offerta e si rendano inevitabili distacchi programmati del carico. Inoltre la forte dipendenza della produzione di energia elettrica dai combustibili fossili si riflette negativamente sia sulle emissioni inquinanti, sia sul costo della bolletta: la prova ne è che l'Italia è il paese con i prezzi più elevati di energia elettrica per le aziende industriali. È dunque logico che, al fine di migliorare la propria competitività, le imprese cerchino di contenere i costi della bolletta elettrica, riducendo così i consumi. Come già affermato l'energia elettrica in Italia corrisponde al 50,3% del consumo totale e di questa circa il 74% è utilizzata per il funzionamento dei motori elettrici. È logico pensare che una maggiore diffusione di questi motori ad alto rendimento elettrico porta ad un notevolissimo risparmio con un relativo calo delle immissioni di CO<sub>2</sub>. Purtroppo esistono delle barriere che ostacolano la diffusione di questi motori ad alta efficienza come, per esempio, l'assenza di chiare informazioni a livello aziendale sulle prestazioni di questi motori e una forte tendenza ad acquistare motori a basso costo senza tener conto del risparmio che possono dare i motori elettrici di ultima generazione. Proprio per tali motivi la loro diffusione è ancora bassa e l'unica nota positiva è che gli accordi volontari che esistevano tra i costruttori di tali motori si sono trasformati in vere e proprie norme che obbligano la sostituzione di motori standard con motori ad alta efficienza, solo in questo modo potremo garantire un futuro risparmio energetico dal punto di vista elettrico.



## **Bibliografia**

1. SIEMENS, “*Risparmio energetico con motori ad alta efficienza*”, Università di Bologna 20 Ottobre 2009.
2. ABB, “*Analisi energetica per la possibile introduzione di azionamenti a velocità variabile*”, Ipotesi di trasferimento sotto azionamento a velocità variabile di applicazioni individuate sotto XXX.
3. Franco Bua, “*Le tre classi di efficienza dei motori*”, Gennaio 2011.
4. L. Taponecco, “*Cap VII - Azionamenti Brushless*”, Appunti di mecatronica.
5. SELIN s.n.c. Elettronica e Informatica, “*Scheda di controllo motore Brushless BBL\_198*”, Cuneo.
6. ABB, “*Efficienza energetica un anno dopo. Motori e inverter: opportunità e criticità*”, 3° giornata sull’Efficienza Energetica. Milano, 20 maggio 2008.
7. CLIMAVENETA s.p.a., “*Il ciclo frigorifero*”, [www.climaveneta.com](http://www.climaveneta.com).
8. SMEM, “*Motori elettrici*”, Catalogo gennaio 2009.
9. Marco Dal Prà, “*Inverter per motori asincroni trifasi. A cosa servono e come funzionano*”, Appunti di elettrotecnica. Dicembre 2008.
10. CNA Energia, “*Motori ad alta efficienza e inverter*”, Schede informative sulle tecnologie energetiche pulite.
11. ENEA, “*Efficienza energetica: motori elettrici e variatori di velocità ad alta efficienza*”, marzo 2007.
12. MOUNTAINSOFT, “*Appunti su norma IEC 61508 e SIL*”, [www.mountainsoft.it](http://www.mountainsoft.it). Marzo 2010.
13. ABB, “*Efficienza e normative. Definizione di norme globali per l’efficienza energetica*”, Dossier Tecnologia.
14. ENEA Unità di Agenzia per lo Sviluppo Sostenibile, “*I motori elettrici ad alta efficienza*”, Sigfrido Vignati e Ennio Ferrero.
15. A. Boffa, “*Motori elettrici ad alto rendimento e inverter. Opportunità e criticità per l’efficienza energetica*”, Marzo 2008.
16. Stefano Pani, “*I vantaggi della variazione di velocità negli impianti di pompaggio e ventilazione*”, c/o Schneider Electric S.p.a.