

I motori elettrici ad alta efficienza

SIGFRIDO VIGNATI
ENNIO FERRERO
ENEA
Unità di Agenzia
per lo Sviluppo
Sostenibile

1

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. Sarà perché i motori elettrici sono componenti molto affidabili, sarà perché sono infaticabili, il fatto è che, come accade sempre per le cose che non danno grane al nostro lavoro, di essi ci dimentichiamo e non ne seguiamo gli sviluppi tecnologici. Eppure, nel settore industriale, attraverso i motori spendiamo quasi il 74% della nostra bolletta elettrica. Due numeri per convincervi. In Italia i consumi elettrici relativi al settore industriale nell'anno 1995^[1] sono stati di circa 124,8 TWh. Di questi circa 92,5 TWh sono stati consumati dai motori elettrici. Le stime al 2010 dei valori percentuali (figura 1) rimangono pressoché invariate.

Nonostante ciò, niente 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 quando acquistiamo un motore ci preoccupiamo solo del suo prezzo. Tutti ci dimentichiamo, invece, che un motore ha un costo di esercizio molto

più elevato di quello di acquisto (figura 2). Per esempio un motore elettrico da 15 kW, ha un costo di circa 520 €, ed un costo di esercizio in dieci anni, considerando 3.500 ore anno e un costo dell'energia elettrica di 7 c€/kWh, di circa 32.000 €: quasi 60 volte il costo iniziale. Nonostante questo, tutti cercano di risparmiare sul costo di acquisto scegliendo motori scadenti, senza pensare che un piccolo extra-prezzo finalizzato all'acquisto di un motore più efficiente potrebbe essere recuperato in pochi mesi di utilizzo.

In questo articolo ci proponiamo di approfondire l'argomento, dando al lettore una serie di strumenti pratici per effettuare velocemente una prima valutazione di convenienza.

Figura 1. Principali consumi elettrici nel settore industriale

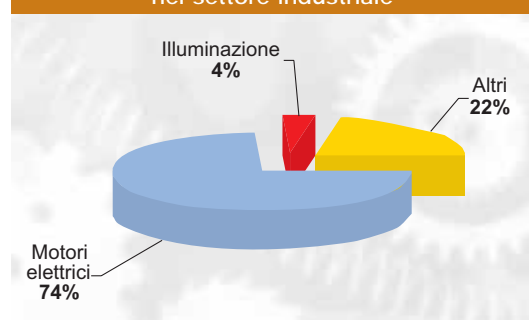
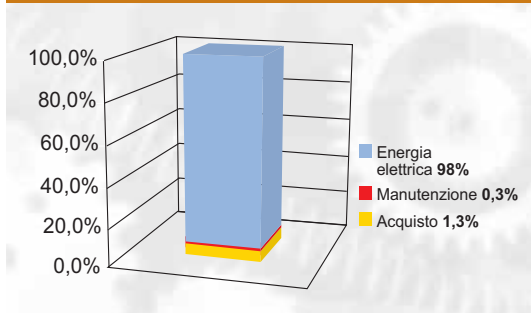


Figura 2. Life Cycle Costing di un motore elettrico



La tecnologia

I motori elettrici ad alta efficienza sono motori che hanno minori perdite rispetto a quelli tradizionali^[2].

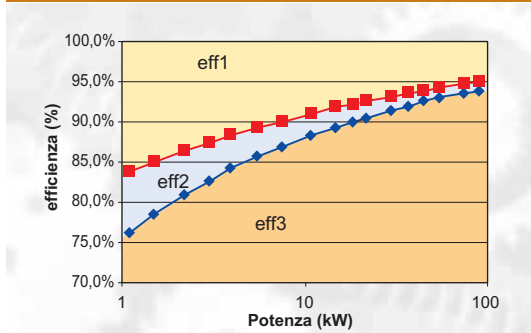
Le perdite in un motore elettrico sono di diversa natura:

- perdite meccaniche, per attrito (nei cuscinetti e alle 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 rotore.

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

- nucleo, realizzato con lamierini a basse perdite che diminuiscono le perdite a vuoto;
- sezione maggiorata dei conduttori dello statore e del rotore per ridurre le perdite per effetto Joule;
- attenta scelta del numero di cave e della geometria delle stesse.

Figura 3. Efficienza di motori elettrici a 4 poli



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 così ottenuti 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.

Un accordo tra costruttori

Non c'è una legge che impone standard minimi sui rendimenti dei motori elettrici. Ognuno può costruire il motore che vuole. Ultimamente, però, 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^[3]. Si sono stabilite tre classi di efficienza eff1, eff2 e eff3 (la eff1 è la migliore, la eff3 la peggiore). Per ogni classe sono stati definiti i rendimenti minimi. I costruttori aderenti all'accordo si sono impegnati a rispettare questi valori minimi. Nel grafico di figura 3¹ sono riportati, per ciascuna classe di efficienza, i rendimenti minimi di un motore a 4 poli in funzione della potenza. Come si può facilmente dedurre dal grafico, man mano che aumenta la potenza le differenze di rendimento tra le classi si assottigliano. In virtù di tale accordo ogni motore avrà la sua marcatura (il simbolo della marcatura è riportato nella figura 4) a dimostrazione della classe di efficienza alla quale appartiene. Così, d'ora in poi, un industriale quando acquisterà un motore elettrico, scegliendo la classe di efficienza, avrà fatto una scelta ben precisa sui costi di esercizio.



Figura 4

I motori attualmente montati nei nostri impianti ovviamente non rientrano in questo accordo perché antecedenti. Possiamo dire che il loro rendimento si trova sicuramente nella zona bassa del grafico contrassegnata da eff3.

¹ L'accordo si riferisce a motori asincroni trifase di bassa tensione, con rotore a gabbia in corto circuito unificati, autoventilati, in costruzione chiusa IP54 e IP55, alimentati a tensione di 400 Volt di linea e 50 Hz, in una gamma di potenza compresa tra 1,1 kW e 90 kW a 2 poli e 4 poli, per servizio continuo S1.

Cosa fare?

Supponiamo di essere un Energy Manager e di avere saputo dell'esistenza dei motori elettrici ad alta efficienza. Come ci dobbiamo comportare?

La prima cosa da fare è un inventario di tutti i motori presenti nello stabilimento. L'inventario non dovrà limitarsi ad un semplice elenco di motori come può essere quello presente presso il magazzino ricambi o il reparto manutenzione, esso dovrà contenere dati tecnici importanti quali: potenza, anno di installazione, rendimento, ore di funzionamento annue, fattore di carico, numero di avvolgimenti subiti, etc.

Tutti questi dati ci permetteranno di conoscere l'energia elettrica consumata dal motore nell'arco dell'anno, l'incidenza percentuale sui consumi dell'azienda, quali motori hanno consumi importanti e meritano attenzione. Una volta completato l'inventario, il nostro scopo è verificare se e quando è conveniente utilizzare i motori ad alta efficienza. Per ogni motore dell'inventario simuliamo due alternative: la prima è che il motore si rompa, la seconda è che il motore anche se funzionante possa essere sostituito con uno ad alta efficienza. Se il motore si rompe (rottura degli avvolgimenti statorici o rotorici) abbiamo due possibilità: fare riavvolgere il motore, come abbiamo sempre fatto, oppure sostituirlo. Ma se dobbiamo sostituirlo, ci sembra giusto farlo (soprattutto dopo la lettura di questo articolo) con uno ad

alta efficienza, anche se costa un po' di più. Siccome con i soldi non si scherza è giusto, però, prima di prendere qualsiasi decisione fare due conti. Possiamo, per esempio, calcolare il payback dell'investimento e vedere se è compatibile con quello accettato nella nostra azienda. Se il payback è inferiore a quel valore acquireremo il motore ad alta efficienza, in caso contrario porteremo il motore dal riparatore per farlo riavvolgere. Per calcolare il payback possiamo utilizzare la formula riportata nel riquadro.

A proposito del calcolo, una cosa importante da non dimenticare è che un motore riavvolto ha un rendimento inferiore rispetto a quello dello stesso motore nuovo. Questa diminuzione può variare dallo 0,5%, se il riavvolgitore è particolarmente bravo, fino al 4%. Per il nostro calcolo utilizziamo un valore conservativo: 1%. Se è la seconda volta che effettuiamo il riavvolgimento, il declassamento del rendimento sarà del 2% e così via. Di questo ne dobbiamo tenere conto nel calcolo.

Anziché utilizzare la formula di cui sopra che, siamo sicuri, molti non gradiscono, abbiamo preferito mettere tutto in forma grafica in maniera da consentire di fare le vostre valutazioni, in modo sicuramente più veloce e più comodo, anche se meno preciso. Vorrà dire che, se le indicazioni provenienti dal grafico sono interessanti, si potrà procedere con un calcolo puntuale.

Il grafico² di figura 5 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.

È evidente che il grafico risente delle ipotesi assunte per i vari parametri, che abbiamo riassunto nella nota a piè di pagina, ma il nostro intento è quello di dare uno strumento operativo di valutazione immediato anche se meno preciso.

Come si usa il grafico? Sull'asse orizzontale individuamo la potenza del motore in questione. Ci muoviamo in verticale fino ad incontrare la curva corrispondente al nostro costo del-

CALCOLO DEL PAYBACK

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

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,

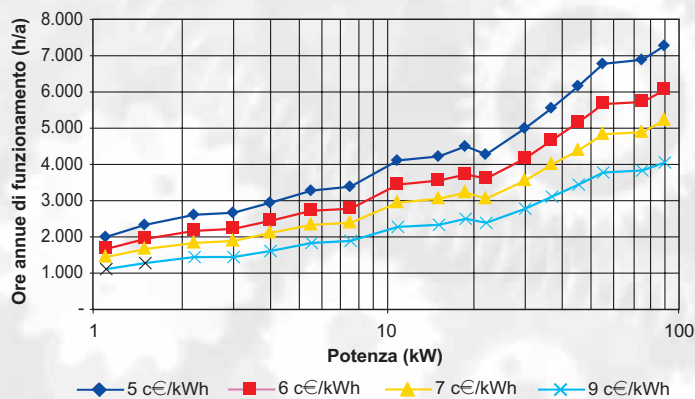
eff_{riav} : perdita di rendimento dovuta al riavvolgimento,

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

c: costo medio del kWh (c€/kWh).

² Il grafico è stato realizzato utilizzando i seguenti valori: tempo di ritorno: 3 anni; coefficiente di carico: 0,75; efficienza del motore esistente pari alla massima di classe eff3 ridotta del 2% per potenze comprese tra 1,1 e 7,5 kW; 1,5% per potenze comprese tra 11 e 22 kW; 1% per potenze maggiori di 22 kW; efficienza del motore ad alto rendimento pari a quella minima della classe eff1; riduzione dell'efficienza del motore in caso di riavvolgimento: 1%; costo del motore ad alta efficienza ricavato dal listino di importanti case costruttrici scontato del 50%; costo del riavvolgimento ricavato da fornitori specializzati.

Figura 5. Convenienza sostituzione motore fuori uso con motore ad alta efficienza



l'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.

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

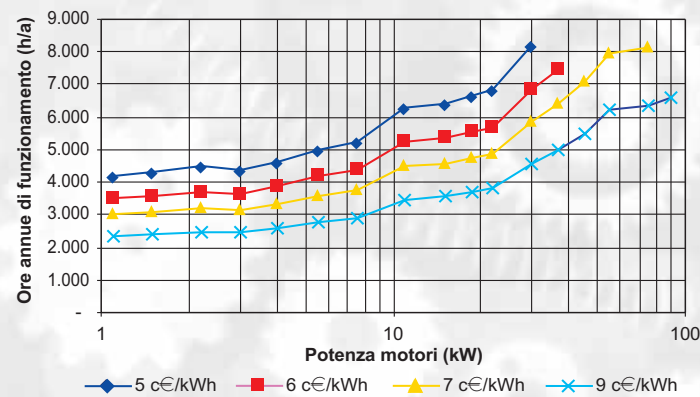
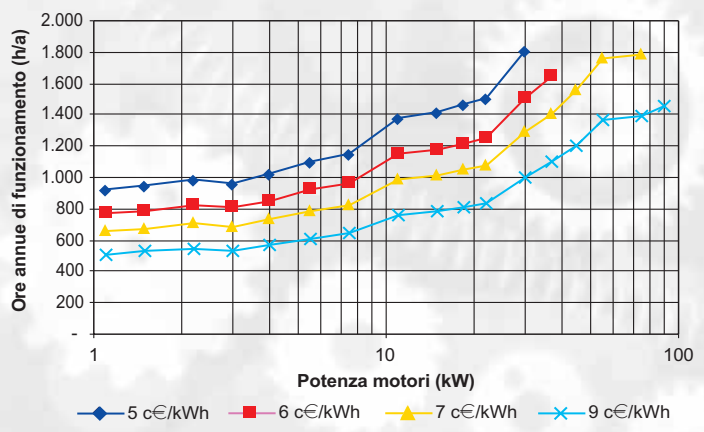


Figura 7. Convenienza acquisto motori nuovi ad alta efficienza



Come si potrà notare dal grafico, per i 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, come è ovvio, la sua grande influenza. Il grafico mostra che più questo è basso e più aumenta il numero di ore di lavoro minimo per la convenienza.

A questo punto possiamo toglierci anche un'altra curiosità. Cioè quella di vedere se conviene sostituire un motore funzionante con uno ad alta efficienza senza aspettare che questo si rompa. Beh, basta applicare la formula del payback con le dovute modifiche. A 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.

Come fatto precedentemente riassumiamo i risultati in un grafico³ (figura 6) lasciando a voi, in caso lo riteniate interessante, il calcolo puntuale. Dal grafico di figura 6 possiamo dedurre che in molte realtà i motori di piccola potenza possono essere sostituiti da subito senza aspettare che arrivino a rottura. E in caso di acquisto di un moto-

³ Il grafico è stato realizzato utilizzando gli stessi valori di quello di figura 5.

re nuovo, cosa dobbiamo fare? Conviene acquistare un motore standard o uno ad alta efficienza? Anche qui per fare le nostre valutazioni ci verrà in aiuto la 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. I risultati sono riportati nel grafico di figura 7.

I decreti sull'efficienza energetica

Non possiamo parlare di motori ad alta efficienza senza citare i decreti sull'efficienza energetica negli usi finali del 24 aprile 2001^[4]. Cosa riguardano questi decreti? Essi 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 in sostituzione di quelli standard.

Ma quanti tep anno può risparmiare un motore ad alta efficienza rispetto ad uno standard? Vediamo di fare due conti e quindi dare un'indicazione sul contributo che questa misura può dare al rispetto dei decreti. Nella tabella di figura 8 abbiamo riportato 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.

Allo stato attuale l'AEEG non ha ancora emesso la delibera attuativa. Per questo motivo non è 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 economico⁴ 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 3.500 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. Ci sembra che l'argomento sia degno di approfondimento.

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),
- eff_{std} : rendimento di un motore standard al punto di lavoro,
- eff_{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.

⁴ Per il calcolo abbiamo considerato gli stessi parametri descritti nella nota 2 come risulta al punto 7.6 del documento dell'AEEG uscito in inchiesta pubblica il 4 aprile 2002 dal titolo "Proposte per l'attuazione dei decreti ministeriali del 24 aprile 2001 per la promozione dell'efficienza energetica negli usi finali".

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

Motor Challenge Programme

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 denominato Motor Challenge Programme (MCP)^[6,7]. 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 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;

- miglioramento dell'immagine derivante dall'uso del logo (rappresentato in figura 9).

Ogni industria 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 la 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.

Il programma sarà lanciato nei primi mesi del 2003 e da quel momento chiunque, potenziale Partner e Endorser, potrà aderire.

Comunque per chi ne volesse sapere di più, può consultare il sito internet:

<http://energyefficiency.jrc.cec.eu.int/>.

Conclusioni

Crediamo di avere detto abbastanza sui motori elettrici ad alta efficienza. Qualcuno di voi sarà ancora scettico ed è lecito che lo sia. Non pretendiamo di avervi convinto. Il nostro intento era quello di fornirvi alcune informazioni importanti su questa tecnologia e soprattutto di avervi fatto venire la voglia di verificare all'interno della vostra azienda la possibilità di utilizzarla.

Bibliografia

1. FLORENTIN KRAUSE, *La Risorsa Efficienza ANPA*, Serie Documenti 11-1999.
2. GREENWOOD P.B., *Motori elettrici ad alto rendimento*, ENEA Risparmio Energetico, n. 41b Luglio-Settembre 1993.
3. Voluntary Agreement of CEMEP, 1999.
4. Decreto 24 aprile 2001, Individuazione degli obiettivi qualitativi per l'incremento dell'efficienza energetica negli usi finali ai sensi dell'art. 9, comma 1, del decreto legislativo 16 marzo 1999, n. 79.
5. AEEG Proposte per l'attuazione dei Decreti Ministeriali del 24 aprile 2001 per la promozione dell'efficienza energetica negli usi finali. Documento di consultazione del 4 aprile 2002.
6. European Commission, Directorate General Energy and Transport. Motor Challenge Programme - Partner Guidelines, 1 Gennaio 2003.
7. European Commission, Directorate General Energy and Transport. Motor Challenge Programme - Drives Module, 1 Gennaio 2003.