

High efficiency electrical machineries: an outlook on the TOC in the industrial sector in Europe

dott. ing. Angelo Baggini
Facoltà di Ingegneria
Università degli Studi di Bergamo
Dalmine (Bergamo)

dott. ing. Franco Bua
ECD
Engineering Consulting and Design
Milano - Pavia

1. INTRODUZIONE

L'impiego di macchine elettriche ad elevata efficienza costituisce uno degli interventi più semplici ed efficaci per ridurre l'impiego di energia elettrica in un processo industriale. I trasformatori di potenza ed i motori elettrici sono infatti due componenti fondamentali degli impianti elettrici utilizzatori. Sono in generale macchine molto efficienti, specie se le si confronta con altre macchine di processo; ma sono macchine attraverso le quali transita tutta l'energia prodotta od utilizzata nell'ambito di un sito produttivo, come nel caso dei trasformatori oppure, come nel caso dei motori che impiegano una grossa fetta dell'energia utilizzata dal processo produttivo.

Ricerche condotte a livello europeo hanno dimostrato che l'impiego di macchine elettriche possono determinare consistenti risparmi che sono riassunti nei dati seguenti:

- risparmi energetici stimabili in circa 20 TWh/anno, per quanto riguarda i trasformatori e 27 TWh/anno per quanto riguarda i motori elettrici;
- riduzione dei costi di esercizio pari a circa 10 miliardi di euro all'anno;
- risparmi in costi di manutenzione valutabili in circa 5 miliardi di euro all'anno;
- riduzione dei costi ambientali pari a circa 6 miliardi di euro all'anno;
- riduzione di emissione di CO₂ pari, rispettivamente, a circa 8 e 10 milioni di tonnellate.

La risposta alla domanda se sia possibile conciliare l'aspetto energetico con quello economico ed ambientale è dunque affermativa. Se l'impiego macchine elettriche ad elevata efficienza è infatti sicuramente vantaggioso da un punto di vista di energetico, si può dimostrare che lo è anche in termini di investimento. Questa conclusione è intuitiva se si considera che il prezzo d'acquisto di queste macchine rappresenta solo una parte marginale del costo totale mentre il costo di esercizio, principalmente legato alle perdite, ne costituisce mediamente il 75% - 85%.

2. EFFICIENZA ENERGETICA DEI TRASFORMATORI DI POTENZA: CRITERI E VALORI DI RIFERIMENTO

2.1. Perdite nei trasformatori di potenza

Le perdite di un trasformatore di potenza sono di due tipi:

- perdite a vuoto¹;
- perdite dovute al carico².

Le perdite a vuoto sono dovute principalmente alle perdite nel circuito magnetico del trasformatore e sono proporzionali al quadrato della tensione. Questo tipo di perdite dipende principalmente dalle modalità costruttive del nucleo magnetico (tipo di materiale usato), dalle condizioni di lavoro (induzione quindi tensione e frequenza).

Le perdite a vuoto si possono considerare costanti in quanto:

- indipendenti dalle condizioni di funzionamento (carico);
- la tensione è mantenuta, per ragioni di servizio, costante.

Le perdite dovute al carico sono dovute principalmente alle perdite negli avvolgimenti e sono proporzionali al quadrato della corrente o, equivalentemente, al quadrato della potenza apparente del carico. Le perdite dovute al carico dipendono quindi fortemente dalle condizioni di funzionamento.

Le perdite totali sono definite come la somma delle perdite a vuoto ed a carico.

2.2. Criteri di efficienza energetica

In linea generale esistono due modi per scegliere un trasformatore energeticamente più efficiente: il primo ed ovvio è quello di scegliere una macchina con perdite totali minori (a parità di potenza nominale); il secondo è quello di dimensionare il trasformatore in modo tale che il punto di funzionamento corrisponda con quello caratterizzato dalla massima efficienza. Il rendimento di un trasformatore è infatti funzione delle condizioni di funzionamento; il punto di massima efficienza si ha generalmente per fattori di carico³ pari al 40–50%.

Quest'ultimo criterio comporta sostanzialmente la scelta di una macchina sovradimensionata rispetto al carico che deve alimentare; in pratica seguendo questo approccio, per alimentare un carico pari a 200 kVA si dovrebbe scegliere un trasformatore di potenza nominale pari a 400 kVA.

Queste due soluzioni, in linea di principio, possono essere anche combinate per sfruttare l'effetto sinergico.

Tutti questi sono criteri di scelta mirati esclusivamente al miglioramento dell'efficienza dei trasformatori e non tengono conto di altre esigenze tecniche e, chiaramente, devono essere giustificati economicamente come si vedrà nel seguito.

2.3. Livelli di efficienza

Il valori delle perdite a vuoto e delle perdite dovute al carico sono stati standardizzati dal CENELEC nel 1992 in due documenti di armonizzazione [3], [4]. In particolare in seno al TC 14 sono state definite tre classi di perdite sia per le perdite a vuoto che per quelle dovute al carico i cui valori sono riportati nella Tabella 2 seguente. Da una classe all'altra le perdite a vuoto diminuiscono del 20% circa mentre le perdite dovute al carico diminuiscono del 25% o del 15%. La scelta di questi valori è stata determinata sulla base dello stato dell'arte della pratica costruttiva europea dell'inizio degli anni novanta. Per quanto riguarda invece i

¹ La norma [2] definisce le perdite a vuoto *la potenza attiva assorbita quando è applicata la tensione nominale (tensione di presa), alla frequenza nominale, ai terminali di uno degli avvolgimenti, essendo l'altro o gli altri avvolgimenti aperti.*

² La norma [2] definisce le perdite dovute al carico *la potenza attiva relativa ad una coppia di avvolgimenti assorbita alla frequenza nominale e alla temperatura di riferimento, quando la corrente nominale (corrente di presa) fluisce attraverso i terminali di linea di uno dei due avvolgimenti essendo i terminali dell'altro avvolgimento cortocircuitati.*

³ Rapporto fra la potenza nominale del trasformatore e la potenza apparente del carico.

trasformatori a secco, allo stato attuale, non è prevista in ambito CENELEC alcuna serie normalizzata a perdite ridotte⁴; l'eccezione nazionale è costituita dalla norma DIN [5].

Una sintesi dei livelli più alti di efficienza dei trasformatori in olio normalizzati in alcuni paesi europei è fornita dalla Tabella 4 fino alla Tabella 11.

Nel 2001, il TC14 del CENELEC ha ricevuto formale mandato dalla Commissione Europea di revisionare la definizione ed il numero delle classi di efficienza dei trasformatori al fine di aumentarne il rendimento e di definire un metodo standard di misurazione del rendimento. In particolare il lavoro è stato diviso in due fasi: la prima prevede la normalizzazione di una serie a perdite ridotte per i trasformatori di potenza a secco, la seconda si propone di definire un ulteriore livello di efficienza per i trasformatori in olio e di studiare la fattibilità di un'eventuale eliminazione del più alto livello di perdite dal documento HD428. Secondo la bozza del documento, la futura norma europea manterrà la stessa struttura ma non indicherà alcuna combinazione come preferita; i nomi delle liste saranno cambiati e riprodurranno lo schema già in uso nel settore degli elettrodomestici (la lettera A indicherà il livello di efficienza più alto); la novità più rilevante è che saranno introdotta una nuova classe di perdita caratterizzata da valori delle perdite più bassi di circa il 15% rispetto alla classe più efficiente dell'edizione precedente.

Tabella 1 – Valori delle perdite dovute al carico (P_K) e delle perdite a vuoto (P_0) definiti dalla bozza del WG21 del CT 14.

Potenza nominale (kVA)	Perdite a vuoto (W)				Perdite dovute al carico (W)			
	D ₀	C ₀	B ₀	A ₀	D _k	C _k	B _k	A _k
50	145	125	110	90	1350	1100	875	750
100	260	210	180	145	2150	1750	1475	1250
160	375	300	260	210	3100	2350	2000	1700
250	530	425	360	300	4200	3250	2750	2350
315	630	520	440	360	5000	3900	3250	2800
400	750	610	520	430	6000	4600	3850	3250
500	880	720	610	510	7200	5500	4600	3900
630	1030	860	730	600	8400	6500	5400	4600
630	940	800	680	560	8700	6750	5600	4800
800	1150	930	800	650	10500	8400	7000	6000
1000	1400	1100	940	770	13000	10500	9000	7600
1250	1750	1350	1150	950	16000	13500	11000	9500
1600	2200	1700	1450	1200	20000	17000	14000	12000
2000	2700	2100	1800	1450	26000	21000	18000	15000
2500	3200	2500	2150	1750	32000	26500	22000	18500

⁴ Il documento di armonizzazione HD 538 prevede che una Norma nazionale possa specificare una seconda serie di trasformatori aventi perdite a vuoto o perdite dovute al carico, o entrambe, inferiori almeno del 15 % rispetto ai valori definiti nel documento stesso e comunque un diverso livello di perdite può essere concordato tra acquirente e costruttore.

Tabella 2 – Valori delle perdite dovute al carico (P_K) e delle perdite a vuoto (P_0) fissati dal documento di armonizzazione CENELEC HD 428 [3].

Potenza nominale (kVA)	Perdite a vuoto (W)			Perdite dovute al carico (W)		
	A'	B'	C'	A	B	C
100	320	260	210	1.750	2.150	1.475
160	460	375	300	2.350	3.100	2.000
250	650	530	425	3.250	4.200	2.750
400	930	750	610	4.600	6.000	3.850
630 (4%)	1.300	1.030	860	6.500	8.400	5.400
630 (6%)	1.200	940	800	6.750	8.700	5.600
1000	1.700	1.400	1.100	10.500	13.000	9.500
1600	2.600	2.200	1.700	17.000	20.000	14.000
2500	3.800	3.200	2.500	26.500	32.000	22.000

Tabella 3 – Valori delle perdite dovute al carico (P_K) e delle perdite a vuoto (P_0) fissati dal documento di armonizzazione CENELEC HD538 [4] per trasformatori a secco.

Tensione nominale (kV)	Potenza nominale (kVA)	Perdite dovute al carico (W)	Perdite a vuoto (W)	Tensione di ctocto (%)
12,0	100	2000	440	4
	160	2700	610	
	250	3500	820	
	400	4900	1150	
	630	7300	1500	6
	630	7600	1370	
	1000	10000	2000	
	1600	14000	2800	
24,0	2500	21000	4300	6
	250	3800	880	
	400	5500	1200	
	630	7800	1650	
	1000	11000	2300	
	1600	16000	3100	
2500	23000	5000		

Tabella 4 – Valori delle perdite dovute al carico (P_K) e delle perdite a vuoto (P_0) fissati dalla Norma CEI 14-13 per i trasformatori in olio MT/BT, serie a perdite normali [6].

Potenza nominale (kVA)	Perdite a vuoto (W)	Perdite dovute al carico (W)	Tensione di ctocto (%)
50	190 (A')	1100 (A)	4
100	320 (A')	1750 (A)	
160	460 (A')	2350 (A)	
250	650 (A')	3250 (A)	
400	930 (A')	4600 (A)	
630	1300 (A')	6500 (A)	
1000	1700 (A')	10500 (A)	6
1600	2600 (A')	17000 (A)	
2000 ⁵	3200 (A')	22000 (A)	
2500	3800 (A')	26500 (A)	

⁵ Questo non è un valore di potenza nominale normalizzato per il documento HD 428.

Tabella 5 – Valori delle perdite dovute al carico (P_K) e delle perdite a vuoto (P_0) fissati dalla Norma DIN [5] per trasformatori a secco.

Tensione nominale (kV)	Potenza nominale (kVA)	Perdite dovute al carico (W), classe termica A	Perdite dovute al carico (W), classe termica E	Perdite dovute al carico (W), classe termica B	Perdite dovute al carico (W), classe termica F	Perdite dovute al carico (W), classe termica H	Perdite a vuoto (W)	Tensione di ctocto (%)
12	100	1700	1800	1850	1950	2100	340	4
	160	2300	2450	2500	2650	2800	460	
	250	3000	3200	3250	3450	3700	620	
	400	4300	4600	4650	4900	5250	880	
	630	6400	6800	6900	7300	7800	1150	
	1000	8800	9300	9500	10000	10700	1560	
12	1600	12700	13400	13600	14300	15300	2200	6
	2500	19000	20000	20200	21200	22700	3300	
	2500	20000	21000	21300	22400	24000	3800	
24	250	3300	3500	3550	3800	4050	670	6
	400	4800	5100	5200	5500	5900	940	
	630	6900	7350	7450	7850	8400	1270	
	1000	9600	10200	10350	10900	11700	1750	
	1600	14000	14800	15000	15800	16900	2400	
	2500	20000	21000	21300	22400	24000	3800	

Tabella 6 - Valori delle perdite dovute al carico (P_K) e delle perdite a vuoto (P_0) fissati dalla Norma CEI 14-13 per i trasformatori in olio MT/BT, serie a perdite ridotte [6].

Potenza nominale (kVA)	Perdite a vuoto (W)	Perdite dovute al carico (W)	Tensione di ctocto (%)
50	150 (B'+3%)	850 (C -3 %)	4
100	250 (B'-4%)	1400 (C -5%)	
160	360 (B'-4%)	1850 (C -7.5%)	
250	520 (B'-2%)	2600 (C -5%)	
400	740 (B'-1.5%)	3650 (C -5%)	
630	1040 (B'+1%)	5200 (C -4%)	
630	900 (B' -4.5%)	5600 (C)	6
1000	1300 (B' -7%)	9000 (C -5%)	
1600	2000 (B'-9%)	13000 (C -7%)	
2000 ^o	2400 (B'-7.5%)	16000 (C -8%)	
2500	2900 (B' -9%)	21000 (C -4.5%)	

Tabella 7 – Livelli di perdite per trasformatori in olio definiti dalla norma NF C 52 – 112 – 1 (Francia)

Potenza nominale (kVA)	Perdite a vuoto (W)	Perdite dovute al carico (W)	Tensione di ctocto (%)
50	145 (B')	1350 (B)	4
100	210 (C')	2150 (B)	
160	460 (A')	2350 (A)	
250	650 (A')	3250 (A)	
400	930 (A')	4600 (A)	
630	1300 (A')	6500 (A)	
800	1220 (B'+5 %)	10700 (B)	6
1000	1470 (B'+5 %)	13000 (B)	
1250	1800 (B'+5 %)	16000 (B)	
1600	2300 (B'+5 %)	20000 (B)	
2000	2750 (B'+5 %)	25500 (B)	
2500	3350 (B'+5 %)	32500 (B)	

Tabella 8 – Livelli di perdite per trasformatori in olio definiti dalla norma DIN 42500 (Germania)

Potenza nominale (kVA)	Perdite a vuoto (W)	Perdite dovute al carico (W)	Tensione di ctocto (%)
50	125 (C')	875 (C)	4
100	210 (C')	1475 (C)	
160	300 (C')	2000 (C)	
250	425 (C')	2750 (C)	
400	610 (C')	3850 (C)	
630	860 (C')	5400 (C)	
630	800 (C')	5600 (C)	6
1000	1100 (C')	9500 (C)	
1600	1700 (C')	14000 (C)	
2500	2500 (C')	22000 (C)	

Tabella 9 – Livelli di perdite per trasformatori in olio definiti dalla norma UNE 21 – 428 (Spagna)

Potenza nominale (kVA)	Perdite a vuoto (W)	Perdite dovute al carico (W)	Tensione di ctocto (%)
50	190 (A')	1100 (A)	4
100	320 (A')	1750 (A)	
160	460 (A')	2350 (A)	
250	650 (A')	3250 (A)	
400	930 (A')	4600 (A)	
630	1300 (A')	6500 (A)	
1000	1700 (A')	10500 (A)	6
1600	2600 (A')	17000 (A)	
2500	3800 (A')	26500 (A)	

Tabella 10 – Livelli di perdite per trasformatori in olio definiti dalla norma NBN C 52223 serie R 93 (Belgio)⁶

Potenza nominale (kVA)	Perdite a vuoto (W)	Perdite dovute al carico (W)	Tensione di ctocto (%)
50	125 (C')	875 (C)	4
100	195 (C' -7%)	1400 (C -5 %)	
160	280 (C' -6.5%)	1850 (C -7.5%)	
250	395 (C' -7%)	2600 (C - 5.5%)	
400	565 (C' - 7.5%)	3650 (C - 5%)	
630	795 (C' - 7.5 %)	5200 (C - 4 %)	

⁶ Questa è la serie normalizzata con il livello di perdite più basso. Esistono anche serie normalizzate di trasformatori con livelli di perdite più elevati.

Tabella 11 – Livelli di perdite per trasformatori in olio definiti in Austria

Potenza nominale (kVA)	Perdite a vuoto (W)	Perdite dovute al carico (W)	Tensione di ctocto (%)
50	125 (C')	875 (C)	4
100	210 (C')	1475 (C)	
160	300 (C')	2000 (C)	
250	425 (C')	2750 (C)	
400	610 (C')	3850 (C)	
630	860 (C')	5400 (C)	
630	800 (C')	5600 (C)	6
1000	1100 (C')	9500 (C)	
1600	1700 (C')	14000 (C)	
2500	2500 (C')	22000 (C)	

3. COSTO TOTALE ATTUALIZZATO DI UN TRASFORMATORE DI POTENZA

Da un punto di vista strettamente finanziario il criterio di scelta più corretto di un trasformatore di potenza è quello di acquistare quella macchina che presenta il costo totale attualizzato più basso. Chiaramente non bisogna commettere l'errore di trascurare alcuna componente di costo e quindi anche il costo delle perdite.

La valutazione della convenienza di una soluzione piuttosto che un'altra deve essere condotta determinando il costo attualizzato della macchina che si compone:

- del costo attualizzato del trasformatore installato (costo della macchina e di tutti gli oneri connessi⁷;
- del costo attualizzato delle perdite a vuoto e delle perdite a carico⁸.

Tuttavia se si vogliono confrontare due trasformatori aventi la stessa potenza nominale ma diversa efficienza (diverso livello di perdite), è possibile trascurare i costi di installazione, manutenzione, riparazione e dismissione⁹.

Assodato che il costo delle perdite è una variabile imprescindibile nella scelta, il problema è quello di determinare un modo per includere il costo delle perdite nel computo. I documenti di armonizzazione CENELEC HD 428 [3] e HD 538 [4] propongono, per il calcolo del costo delle perdite a vuoto e delle perdite a carico, la formula seguente:

$$C_I = A \cdot P_0 + B \cdot P_k$$

dove:

- A è il costo unitario delle perdite a vuoto nominali del trasformatore (€/kW);
- B è il costo unitario delle perdite dovute al carico nominali del trasformatore (€/kW).

I coefficienti A e B sono particolari di ogni utenza e dovrebbero essere calcolati caso per caso. Questi coefficienti dipendono infatti da vari fattori quali il diagramma di carico, il costo unitario della potenza impegnata ed il costo dell'energia. Tuttavia per avere un riferimento relativamente al loro ordine di grandezza è possibile fare riferimento ai valori riportati in Tabella 12 calcolati tenendo conto dei profili standard degli utilizzatori industriali di energia elettrica definiti dall'EUROSTAT.

⁷ In generale il costo di installazione, di manutenzione, di eventuali riparazioni ed infine quello di dismissione.

⁸ In linea di principio tanto minori sono le perdite tanto maggiore è la convenienza del trasformatore ma, dato il costo d'acquisto maggiore di una macchina a perdite ridotte, l'effettivo risparmio deve essere attentamente valutato lungo la vita utile della macchina.

⁹ Queste componenti di costo possono essere considerati infatti indipendenti dal progetto del trasformatore al contrario di quanto accade invece per le perdite totali.

Tabella 12 – Valori indicativi dei coefficienti A e B per trasformatori MT/BT industriali [8].

Codice EUROSTAT	A (€/kW)	B (€/kW)
lc	8.154,37	700,94
ld	7.706,75	1.666,70
le	7.387,01	2.553,19
lf	6.947,37	2.650,78
lg	6.087,65	3.199,18
lh	5.618,71	2.454,50
li	5.306,08	3.238,91

È necessario inoltre tener presente che costo delle perdite si distribuisce durante la vita utile del trasformatore e deve essere quindi scontato al momento dell'acquisto in funzione del tasso di attualizzazione e, appunto, della vita utile della macchina. Infine sarebbe necessario prevedere l'andamento del diagramma di carico del trasformatore e l'andamento del costo dell'energia al fine di poter effettuare una valutazione ancora più accurata del costo totale d'esercizio.

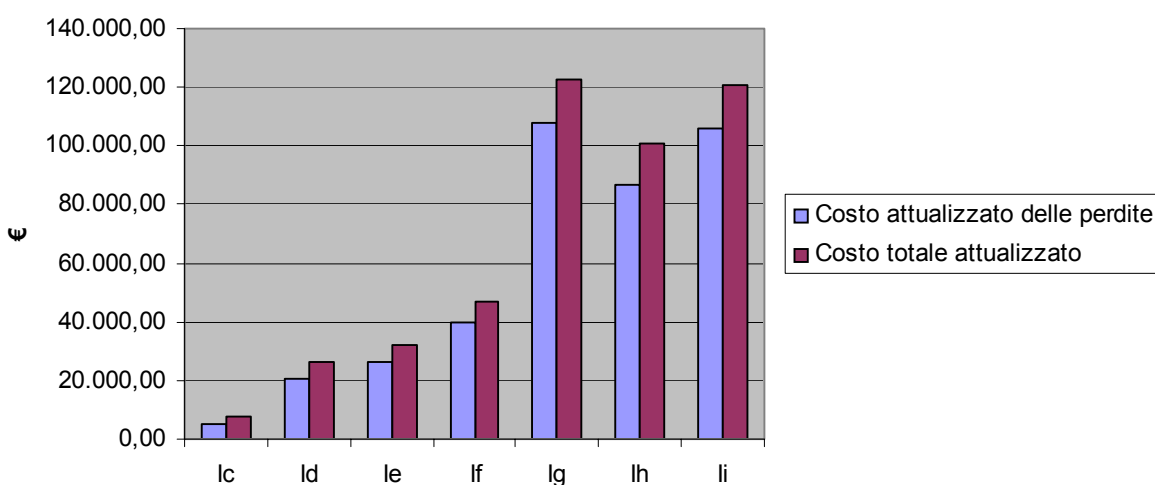


Figura 1 - Costo attualizzato delle perdite e costo totale attualizzato di un trasformatore in olio a perdite normali.

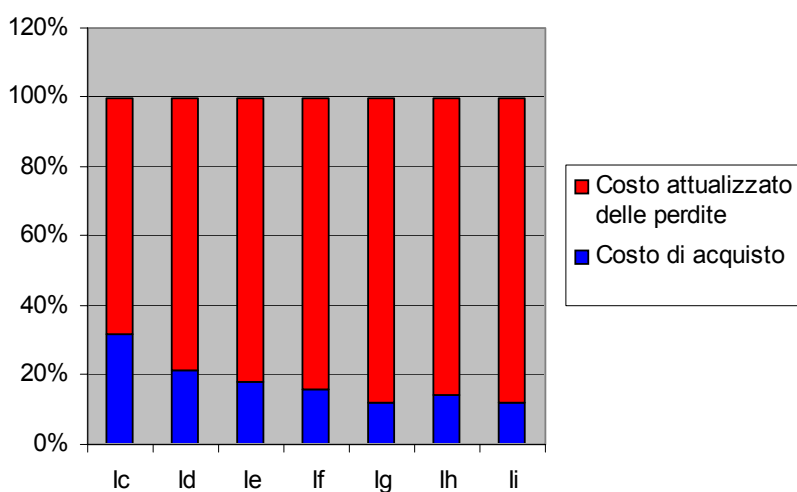


Figura 2 - Composizione del costo totale attualizzato di un trasformatore in olio a perdite normali.

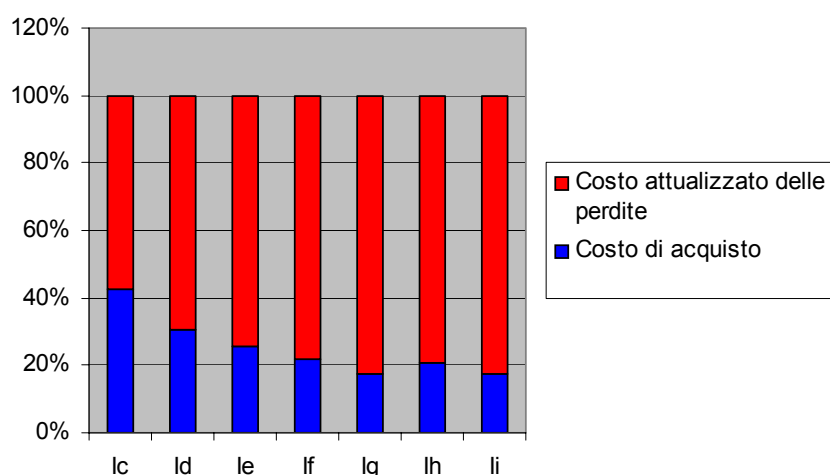


Figura 3 - Composizione del costo totale attualizzato di un trasformatore in olio a perdite ridotte.

4. OTTIMO TECNICO-ECONOMICO NELLA SCELTA DI UNA TRASFORMATORE DI POTENZA

Uno studio condotto sui trasformatori MT/BT industriali, isolati in olio [8] ha dimostrato come l'impiego di trasformatori a perdite ridotte si giustifica non solo in termini energetici ma anche in termini economici.

Gli utenti industriali sono stati caratterizzati secondo la classificazione EUROSTAT in termini di consumo annuale di energia elettrica, potenza impegnata, ore annue di utilizzazione (Tabella 13) e costo dell'energia¹⁰ ed è stato effettuato il confronto tra l'impiego di trasformatori con livelli di efficienza diversi, assumendo come caso base quello relativo al trasformatore a perdite normali. La vita utile dei trasformatori è stata ipotizzata pari a 10 anni. I prezzi dell'energia elettrica e del diagramma di carico sono stati considerati costanti nell'arco della vita del trasformatore.

Tabella 13 – UtENZE industriali standard considerate nello studio [8].

Codice	Consumo annuale (kWh)	Massima potenza (kW)	Ore annue di utilizzazione
lc	160.000	100	1.600
ld	1.250.000	500	2.500
le	2.000.000	500	4.000
lf	10.000.000	2.500	4.000
lg	24.000.000	4.000	6.000
lh	50.000.000	10.000	5.000
li	70.000.000	10.000	7.000

¹⁰ EUROSTAT: Electricity prices for UE industry in January 2002. In particolare è stato considerato il prezzo dell'energia elettrica al netto dell'IVA. Il costo della potenza impegnata è stato determinato sulla base delle tariffe vigenti per utenze MT.

Tabella 14 – Ipotesi circa la potenza nominale ed il numero dei trasformatori per ciascuna utenza industriale standard [8].

Utenza industriale standard	Massima potenza (kW)	Fattore di potenza	N° di trasformatori	Potenza nominale (kVA)
lc	100	0,90	1,00	160
ld	500	0,90	1,00	630
le	500	0,90	1,00	630
lf	2500	0,90	3,00	1000
lg	4000	0,90	2,00	2500
lh	10000	0,90	5,00	2500
li	10000	0,90	5,00	2500

I risultati principali di questo studio possono essere così sintetizzati:

- l'impiego di un trasformatore a perdite ridotte ha per tutte le categorie di consumatori industriali il costo totale attualizzato minore (Figura 4 e Figura 5);
- sovradimensionare un trasformatore al fine di esercirlo al punto di massima efficienza non è una soluzione economicamente vantaggiosa;
- l'impiego combinato di una macchina più efficiente e sovradimensionata rispetto al carico non sempre ha un effetto sinergico dal punto di vista energetico e più spesso questa soluzione ha un costo maggiore dell'impiego di un trasformatore a perdite normali;
- la scelta di un trasformatore a perdite ridotte ha il tempo di ritorno dell'investimento più breve tra le opzioni analizzate con un PBT medio pari a 2,8 anni (Tabella 15);
- trasformatori più efficienti da un punto di vista energetico rispetto alla serie a perdite ridotte hanno costi totali solo di poco inferiori rispetto alla serie a perdite ridotte ed hanno tempi di ritorno più lunghi.

Tabella 15 – Payback semplice dell'opzione relativa all'acquisto di un trasformatore MT/BT in olio a perdite ridotte rispetto ad un trasformatore a perdite normali, per utenze industriali standard.

Utenza industriale standard	Payback semplice (anni)
lc	5,4
ld	3,1
le	2,7
lf	2,8
lg	1,6
lh	2,0
li	1,7

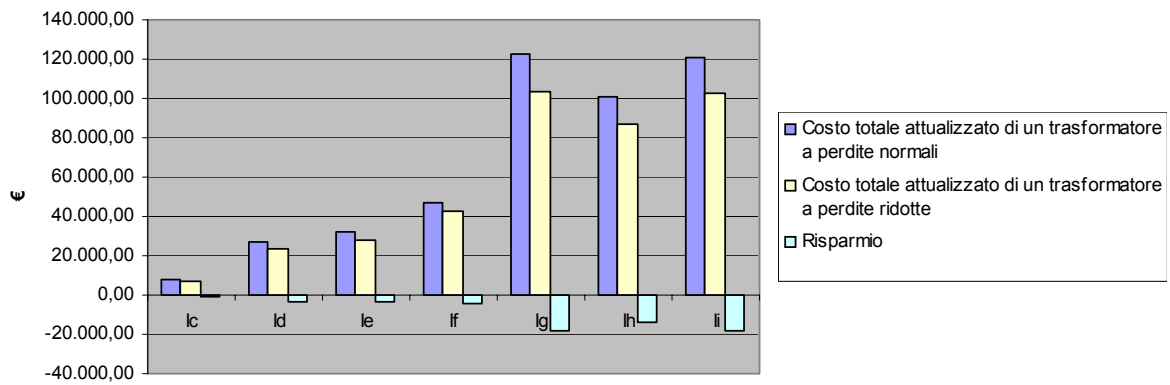


Figura 4 - Confronto tra il costo totale attualizzato di un trasformatore in olio a perdite normali ed il costo totale di un trasformatore in olio a perdite ridotte.

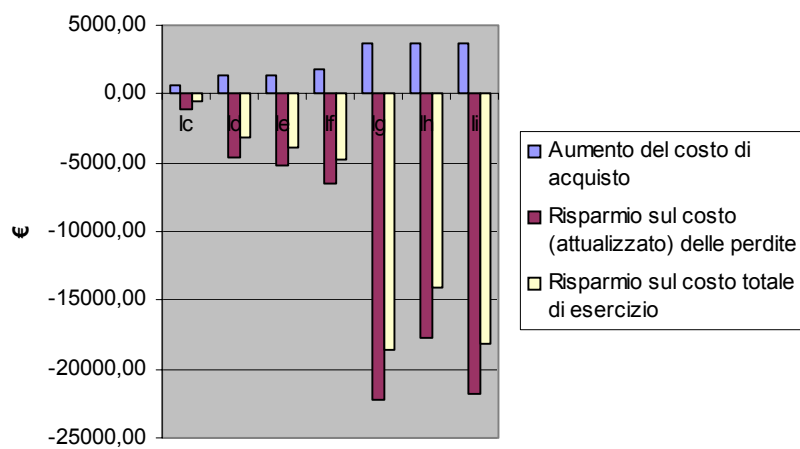


Figura 5 - Composizione della differenza tra il costo totale attualizzato di un trasformatore in olio a perdite normali ed il costo totale attualizzato di un trasformatore in olio a perdite ridotte.

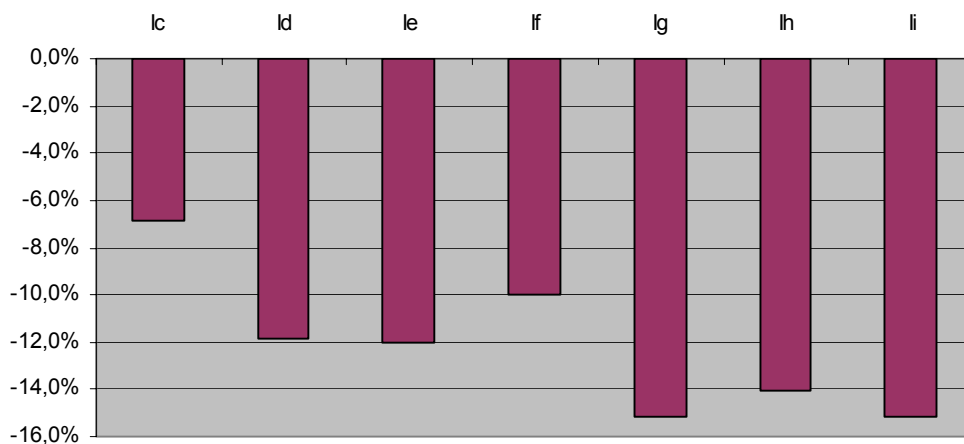


Figura 6 - Differenza percentuale tra il costo totale attualizzato di un trasformatore in olio a perdite normali ed il costo totale attualizzato di un trasformatore in olio a perdite ridotte.

5. EFFICIENZA ENERGETICA DEI MOTORI ELETTRICI

In generale il rendimento di un motore elettrico¹¹ dipende dal tipo di progetto ed in particolare dalla qualità e dalla quantità del materiale impiegato per la sua costruzione¹² ed è variabile in funzione del tipo di motore, della taglia del motore ma soprattutto del coefficiente di utilizzo¹³. Il rendimento di un motore dipende infatti dal punto di lavoro e nello specifico, decresce al diminuire del coefficiente di utilizzo; quando questo è inferiore a 0,5-0,6 la diminuzione è particolarmente drastica (Figura 7). Con riferimento alla taglia del motore, il rendimento cresce all'aumentare della potenza nominale. Valori tipici di rendimento (riferiti ad un coefficiente di utilizzo pari a 0,75) sono compresi tra 75-95%, per taglie comprese tra 1 e 200 kW.

È importante sottolineare che la riduzione delle perdite in un motore comporta in generale, oltre al vantaggio del risparmio energetico, anche una riduzione delle sovratemperature e quindi un aumento della vita della macchina (a parità di sistema di isolamento) e del grasso di lubrificazione e la possibilità di ridurre la ventilazione e la rumorosità ad essa collegata. Un motore con rendimenti più alti consente inoltre:

- maggiori rendimenti ai carichi ridotti, essendo maggiormente contenute le perdite a vuoto;
- maggiore capacità di sopportare squilibri e variazioni di tensione della rete di alimentazione;
- maggiori vantaggi nelle applicazioni con alimentazione da inverter.

Fin qui i richiami generali relativi al rendimento di un motore elettrico. Ma quali sono gli standard energetici dei motori BT realmente disponibili sul mercato? Nel 2000 è stato siglato un accordo volontario tra i principali produttori europei di macchine elettriche rappresentati dal CEMEP (Comitato Europeo costruttori Macchine rotanti e Elettronica di Potenza) e la Commissione Europea DG XVII, per la costruzione di motori elettrici ad alto rendimento¹⁴. Sono state stabilite tre classi di efficienza EFF1, EFF2 e EFF3 che differenziano i motori in funzione del livello di rendimento; la classe EFF3 definisce lo standard attuale ed EFF1 indica il livello di eccellenza. Per ogni classe sono stati stabiliti i rendimenti minimi. L'incremento di rendimento definito è compreso tra 1 e 6 punti percentuali rispetto al livello di efficienza EFF3 (mediamente circa 2,5 punti percentuali). La classe di efficienza è indicata da un'etichetta posta sulla targa del motore (Figura 8).

L'ultimo report di monitoraggio indica che le aziende che hanno finora aderito sono 36 e che la riduzione del segmento di mercato occupata dai motori elettrici di classe EFF3 si è significativamente ridotta in questi ultimi 2 anni, in linea con gli obiettivi dell'accordo.

¹¹ Le perdite in un motore elettrico sono principalmente di tre tipi: le perdite dovute al carico, per effetto Joule negli avvolgimenti di statore e rotore, proporzionali al quadrato della corrente assorbita quindi della potenza erogata; le perdite a vuoto nel ferro per isteresi e per correnti parassite, proporzionali al quadrato della tensione; le perdite meccaniche, per attrito e per ventilazione.

¹² Nei motori ad alta efficienza si utilizzano nella costruzione del nucleo, materiali magnetici a basse perdite e conduttori elettrici di sezione maggiorata per gli avvolgimenti di statore e di rotore insieme ad una opportuna scelta della geometria e del numero di cave.

¹³ Rapporto tra la potenza nominale erogata all'albero e la potenza nominale del motore.

¹⁴ L'accordo si riferisce a motori asincroni trifase BT, con rotore a gabbia unificati, autoventilati, in costruzione chiusa (IP54 e IP55), ventilati, 400V, 50Hz, potenza compresa tra 1,1 kW e 90 kW, 2 poli e 4 poli, servizio continuo S1 che costituiscono la tipologia più diffusa del mercato di motori elettrici BT.

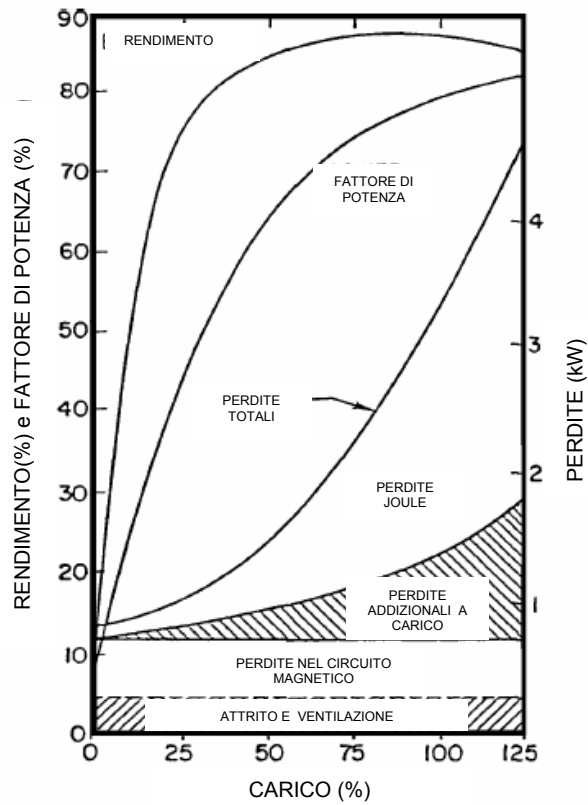


Figura 7 – Andamento delle perdite, dell'efficienza e del fattore di potenza di un motore asincrono in funzione del coefficiente di utilizzo.



Figura 8 – Etichette relative alle 3 classi di efficienza energetica dei motori BT rientranti nell'accordo tra CEMEP e Commissione Europea DGXVII

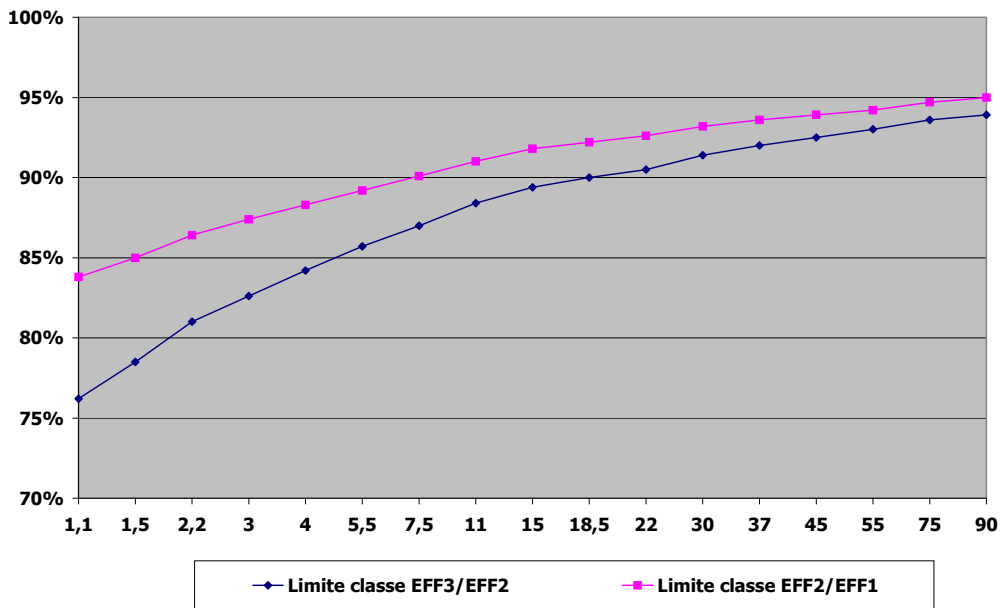


Figura 9 – Limiti delle classi di efficienza definite dall'accordo volontario tra CEMEP e Commissione Europea DGXVII.

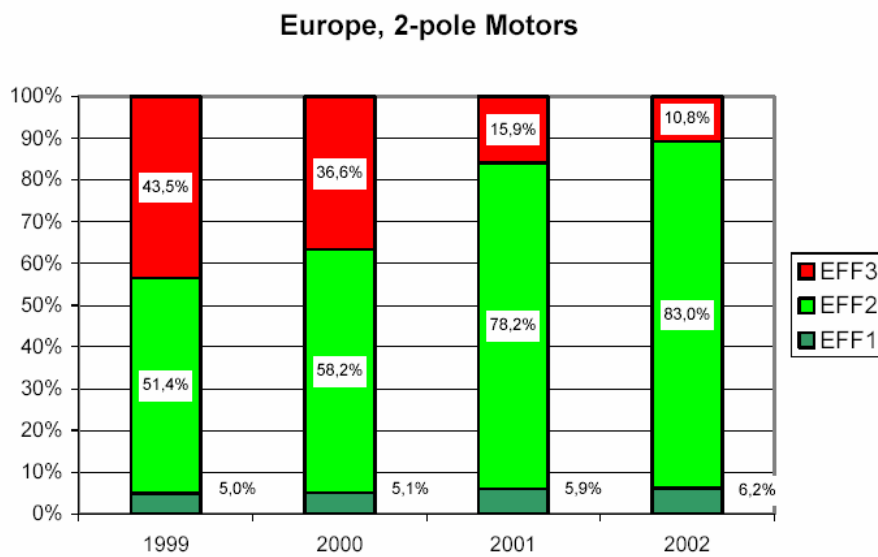


Figura 10 – Sintesi della penetrazione nel mercato europeo dei motori elettrici BT appartenenti alle 3 classi di efficienza [17] (Motori a 2 poli)

Europe, 4-pole Motors

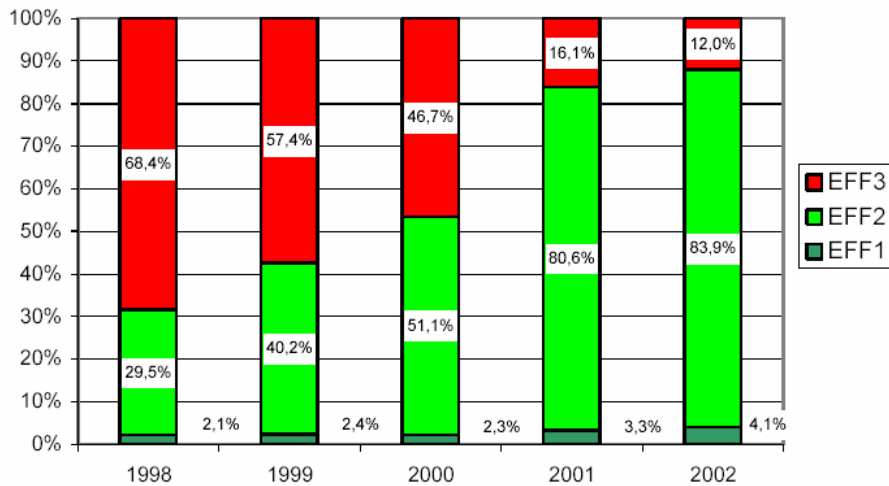


Figura 11 – Sintesi della penetrazione nel mercato europeo dei motori elettrici BT appartenenti alle 3 classi di efficienza [17] (Motori a 4 poli)

6. CONVENIENZA ECONOMICA DEI MOTORI ELETTRICI AD ELEVATA EFFICIENZA (EEEM)

La convenienza economica dell'impiego di motori elettrici ad alta efficienza può essere valutata rispetto a 3 possibili scenari:

- acquisto di un nuovo motore;
- acquisto di un motore ad alta efficienza invece di riparare un motore guasto;
- sostituzione di un motore in servizio con un motore ad alta efficienza.

In termini assolutamente generali la valutazione economica di investimenti alternativi di questo tipo dipende principalmente dai seguenti fattori:

- costo dell'energia (€/kWh) e della potenza impegnata (€/kW);
- potenza nominale del motore;
- rendimento nominale del motore;
- fattore di carico del motore;
- ore di funzionamento annue del motore.

In quanto segue si analizzeranno i 3 scenari descritti e si daranno alcuni dati di sintesi utili a valutare in via preliminare la convenienza dell'impiego di motori ad alta efficienza.

Nella valutazione della convenienza dell'impiego di EEEM non sono inoltre da trascurare i vantaggi derivanti dall'applicazione dei Decreti sull'efficienza energetica negli usi finali del 24 aprile 2001. Ai risparmi conseguiti corrispondono dei riconoscimenti sotto forma di titoli di efficienza energetica (TEE) che saranno rilasciati secondo la delibera 103/03¹⁵. I TEE saranno negoziabili ed il riconoscimento economico può essere stimato pari a circa 150-200€/tep [13], il che potrebbe portare a drastiche riduzioni dei tempi di ritorno dell'investimento.

6.1. Convenienza economica di un EEEM nel caso di un nuovo acquisto

Quando si considera l'acquisto di un nuovo motore è possibile confrontare la convenienza dell'acquisto un motore ad alta efficienza invece di uno tradizionale. In questo caso il fattore

¹⁵ Delibera AEEG n° 103/03: Linee guida per la preparazione, esecuzione e valutazione dei progetti di cui all'articolo 5, comma 1, dei decreti ministeriali 24 aprile 2001 e per la definizione dei criteri e delle modalità per il rilascio dei titoli di efficienza energetica (GU n. 234 dell'8-10- 2003)

rilevante nella valutazione economica è la differenza del costo d'acquisto di un motore ad alta efficienza e quello di uno tradizionale.

Come valori di riferimento si può dire che il maggior costo di un motore ad alta efficienza rispetto a quello di uno tradizionale, a parità di potenza nominale, è pari a circa il 20-40%. La differenza di costo è dovuta alla maggiore qualità e quantità dei materiali utilizzati (e.g. lamierini a basse perdite, sezione più elevata dei conduttori degli avvolgimenti di statore e di rotore etc.).

In generale si può dire che la convenienza dell'acquisto di un motore ad alto rendimento è maggiore per motori caratterizzati da un numero elevato di ore di funzionamento. In questi casi il tempo di ritorno dell'investimento è compreso tra 1 e 3 anni. Sempre in termini indicativi, dai dati di letteratura si ricava che il payback diminuisce linearmente con le ore di funzionamento e mostra inoltre un trend crescente nell'intervallo di potenze 100 – 250 kW.

Una sintesi dei valori indicativi della convenienza economica dell'acquisto di motori nuovi ad alta efficienza è riportata nella Tabella 16 seguente.

Tabella 16 – Valori indicativi della convenienza economica dell'acquisto di motori nuovi ad alta efficienza [10].

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

I valori sono riferiti ai seguenti dati: potenza nominale compresa tra 1 kW e 100 kW; coefficiente di utilizzo: 0,75; costo dell'energia pari a 5c€/kWh; costo dell'impegno di potenza 22€/kW anno

Chiaramente se, come indice di valutazione dell'investimento, si utilizza payback semplice, si ignora ciò che succede dopo il tempo di recupero del capitale e questo è particolarmente penalizzante per investimenti che assicurano benefici nel corso di un periodo temporale lungo, molto maggiore del tempo di ritorno. Se infatti, per valutare l'investimento si tiene conto del costo attualizzato delle perdite lungo l'intera vita utile del motore, si ricava che l'acquisto di motori ad alta efficienza è conveniente, per motori di potenza nominale superiore a 7,5 kW, per un numero di ore di funzionamento annuo pari a circa 300¹⁶; per taglie inferiori la compensazione avviene per un numero di ore di funzionamento annuo superiore pari a circa 2500-3000.

¹⁶ Nelle stesse ipotesi di calcolo della Tabella 16 e considerando una vita utile del motore pari a 15 anni ed un tasso di interesse pari al 5%.

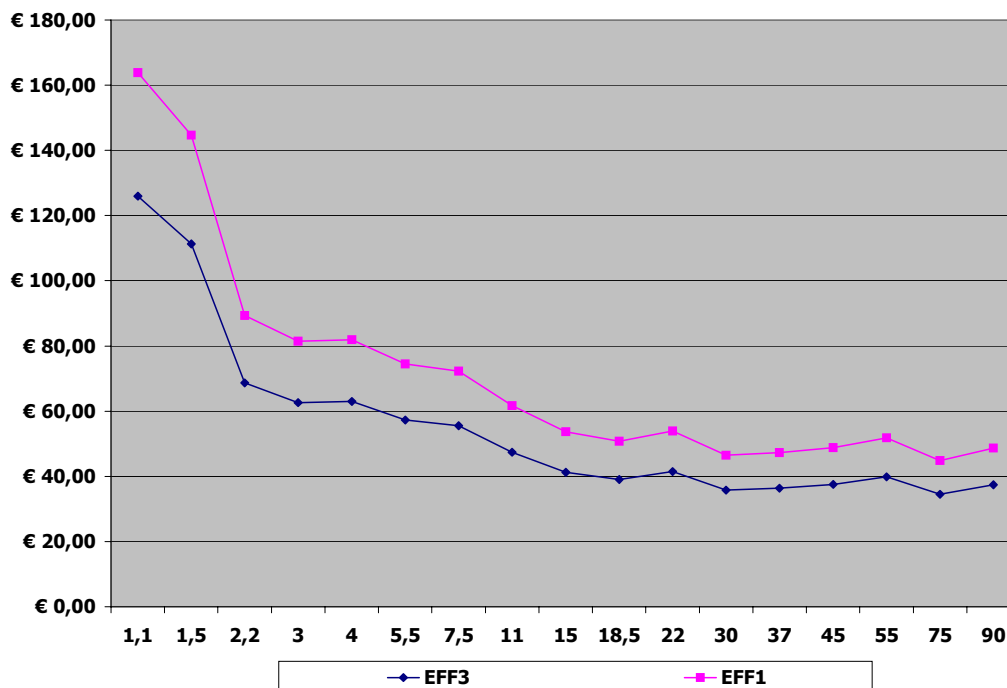


Figura 12 –Costo unitario indicativo medio (€/kW) di motori elettrici appartenenti alle classi di efficienza EFF3 ed EFF1.

6.2. Convenienza economica dell'acquisto di un EEEM rispetto alla riparazione di un motore guasto

Quando si deve scegliere tra la riparazione di un motore guasto¹⁷ e l'acquisto di un motore ad alta efficienza la differenza di costo imputabile alla soluzione energeticamente più efficiente è pari alla differenza tra il costo di un motore ad alta efficienza ed il costo del riavvolgimento di quello esistente.

In questo caso si deve tener conto che, in termini generali, l'operazione di riavvolgimento comporta un peggioramento delle prestazioni energetiche del motore variabile, a seconda della perizia dell'operatore, tra 1 e 4 punti percentuali. Riavvolgere un motore elettrico significa quindi rimettere in servizio un motore il cui rendimento è minore rispetto allo stesso motore, appena acquistato.

Come per il caso precedente, la convenienza dell'acquisto di un motore ad alto rendimento è elevata per motori caratterizzati da un numero elevato di ore di funzionamento (payback compresi tra 0,5 e 2 anni) ed il payback dell'investimento diminuisce linearmente con le ore di funzionamento.

A differenza però di quanto accade nel caso di un nuovo acquisto, il tempo di ritorno dell'investimento mostra un trend crescente in funzione della potenza nominale del motore; conseguentemente per motori piccoli (1-11 kW) l'investimento risulta estremamente interessante.

In questo scenario esiste inoltre una dipendenza dalla tipologia costruttiva del motore ed in particolare dal fatto che la costruzione sia chiusa o aperta; per i motori con costruzione aperta il payback è più breve rispetto ai motori con costruzione chiusa ed è compreso tra 1 e 3 anni.

Una sintesi dei valori indicativi della convenienza economica dell'acquisto di motori ad alta efficienza rispetto alla riparazione di un motore guasto sono riportati nella Tabella 17 e nella Tabella 18 seguenti.

¹⁷ Tipicamente la riparazione consiste nella sostituzione degli avvolgimenti (riavvolgimento), mantenendo, se possibile, il circuito magnetico.

Tabella 17 – Valori indicativi della convenienza economica dell'acquisto di motori nuovi ad alta efficienza (costruzione chiusa, ventilazione esterna) [10].

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

I valori sono riferiti ai seguenti dati: coefficiente di utilizzo: 0,75; costo dell'energia pari a 5c€/kWh; costo dell'impegno di potenza 22€/kW anno; perdita di rendimento del motore riavvolto 2%

Tabella 18 – Valori indicativi della convenienza economica dell'acquisto di motori nuovi ad alta efficienza (costruzione aperta) [10].

Ore annue di funzionamento	Payback semplice
2.000	0-3 anni
4.000	0-2 anni
6.000	0-1 anni

I valori sono riferiti ai seguenti dati: potenza nominale compresa tra 1 kW e 100 kW; coefficiente di utilizzo: 0,75; costo dell'energia pari a 5c€/kWh; costo dell'impegno di potenza 22€/kW anno; perdita di rendimento del motore riavvolto 2%

Anche in questo caso vale la considerazione che se si utilizza come indice di valutazione dell'investimento il payback, si trascurano i minori costi conseguiti dopo il tempo di ritorno, fino al termine della vita utile del motore.

6.3. Convenienza economica della sostituzione di un motore in servizio con un EEEM

Quando si vuole valutare la convenienza della sostituzione di un motore in servizio con un motore ad alta efficienza, la differenza di costo imputabile alla soluzione energeticamente più efficiente è pari al costo del motore ad alta efficienza sommato al costo della manodopera necessaria per la rimozione del vecchio e l'installazione del nuovo.

In generale non si considera mai nel calcolo economico il valore del motore sostituito perché di fatto non esiste un mercato rilevante di motori usati.

Dai dati di letteratura si ricava che la sostituzione di motori in servizio non è particolarmente interessante per un numero di ore di funzionamento annuo basso (per esempio 2000), a meno che il costo dell'energia non sia particolarmente elevato (>10c€/kWh). Altrettanto poco interessante sembra essere la sostituzione di motori di piccola taglia (1-3,5 kW) e di motori aventi potenza nominale superiore a 100 kW.

Una sintesi dei valori indicativi della convenienza economica della sostituzione di motori esistenti è stata riportata in Tabella 19.

Tabella 19 – Valori indicativi della convenienza economica della sostituzione di motori in servizio con motori ad alta efficienza [10].

Ore annue di funzionamento	Payback semplice
2.000	8-10 anni
4.000	5-7 anni
6.000	4-5 anni
I valori sono riferiti ai seguenti dati: potenza nominale compresa tra 1 kW e 100 kW; coefficiente di utilizzo: 0,75; costo dell'energia pari a 5c€/kWh; costo dell'impegno di potenza 22€/kW anno	

Ancora una volta l'impiego di altri indici per la valutazione dell'investimento che tengano conto dell'intera vita utile del componente, aumenta la convenienza dell'impiego di EEEM. Esistono infine condizioni che possono migliorare l'interesse, indipendentemente dal metodo di valutazione utilizzato, come ad esempio:

- la possibilità di scontare prezzi particolarmente bassi nel caso di sostituzioni in stock;
- il fatto che il motore elettrico è molto sovradimensionato rispetto al carico;
- il numero di ore di funzionamento annuo a pieno carico elevato.

7. CONCLUSIONI

Le macchine elettriche ad alta efficienza sono un prodotto disponibile sul mercato il cui impiego costituisce una concreta occasione di risparmio energetico ed una efficace misura di riduzione dell'impatto ambientale del processo produttivo. Tra le varie strategie di scelta di una macchina elettrica, il criterio più corretto è quello di considerare la macchina che presenta il costo attualizzato più basso, includendo nel costo della macchina anche il costo delle perdite in quanto esse rappresentano:

- un costo di esercizio tanto più rilevante quanto più elevato è il costo dell'energia elettrica;
- un costo di acquisizione della macchina inversamente proporzionale al loro valore;
- un aspetto ambientale significativo di un qualsiasi processo produttivo.

8. BIBLIOGRAFIA

- [1] *The scope for energy saving in the EU through the use of energy efficient distribution transformers*. Thermie Project n° STR-1678-98 - BE
- [2] CEI EN 60076-1: *Power transformers*. Part 1: General. III Edition.
- [3] HD 428.1 S1:1992: *Three phase oil-immersed distribution transformers 50 Hz, from 50 kVA to 2500 kVA, with highest voltage for equipment not exceeding 36 kV. Part 1: General requirements and requirements for transformers with highest voltage for equipment not exceeding 24 kV.*
- [4] HD 538.1 S1:1992: *Three-phase dry-type distribution transformers 50 Hz, from 100 kVA to 2500 kVA, with highest voltage for equipment not exceeding 36 kV Part 1: General requirements and requirements for transformers with highest voltage for equipment not exceeding 24 kV.*
- [5] DIN 42 523: *Transformers; encapsulated-winding dry-type transformers; 50 Hz, 100 to 2500 kVA*. May 1987.
- [6] Norma CEI 14-13: 1998: *Trasformatori trifase per distribuzione a raffreddamento naturale in olio, di potenza 50-2500 kVA, 50 Hz, con tensione massima U_m per il componente non superiore a 36 kV. Parte 1: Prescrizioni generali e prescrizioni per trasformatori con tensione massima U_m per il componente non superiore a 24 kV.*

- [7] Norma CEI 14-12: 1998: *Trasformatori trifase di distribuzione di tipo a secco 50 Hz, da 100 kVA a 2500 kVA, con una tensione massima per il componente non superiore a 36 kV - Parte 1: Prescrizioni generali e prescrizioni per trasformatori con una tensione massima per il componente non superiore a 24 kV.*
- [8] A. Baggini, F. Bua: *Evaluation of the total owning cost of MV/LV for industrial distribution transformers with different loss levels.* 3rd International Workshop on Transformer Efficiency. Treviso, September 2002.
- [9] G Petrecca: *Industrial energy management.* Kluwer Academic Publisher, 1992.
- [10] S. Nadel, M. Shepard, S. Greenberg, G. Katz, A. T. De Almeida: *Energy efficient motor systems.* American Council for an Energy efficient Economy. 1992
- [11] A.T. De Almeida and F. Ferreira: *Efficiency Testing of Electric Induction Motors.*
- [12] CADDET: *Saving energy with industrial motors and drives.* 1995
- [13] S. Vignati, E. Ferrero: *Motori elettrici ad alta efficienza.* Gestione Energia n°4, 2002
- [14] EuroDEEM Database of energy-efficient electric motors
- [15] Motor Challenge Program: <http://energyefficiency.jrc.cec.eu.int/>
- [16] CEMEP: <http://www.cemep.org/cemep/header.htm>
- [17] CEMEP: *Report 2002 of the voluntary agreement on LV AC motors.* Frankfurt 12 August 2003