



Ricerca di Sistema elettrico

Identificazione di tecnologie efficienti ad
alto potenziale applicativo in ambito
industriale e sviluppo di algoritmi per
analisi tecno-economiche di interventi di
efficientamento

G. Cavazzini, S. Bari, G. Pavesi, G. Ardizzon

IDENTIFICAZIONE DI TECNOLOGIE EFFICIENTI AD ALTO POTENZIALE APPLICATIVO IN AMBITO INDUSTRIALE E SVILUPPO DI ALGORITMI PER ANALISI TECNO-ECONOMICHE DI INTERVENTI DI EFFICIENTAMENTO
G. Cavazzini, S. Bari, G. Pavesi, G. Ardizzon (Dipartimento di Ingegneria Industriale)

Settembre 2016

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

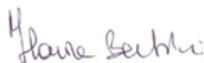
Piano Annuale di Realizzazione 2015

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

Progetto: "Processi e macchinari industriali"

Obiettivo: "Metodologia per la caratterizzazione di processi industriali energivori: benchmark e valutazione dei potenziali di risparmio energetico"

Responsabile del Progetto: Ing. Ilaria Bertini, ENEA

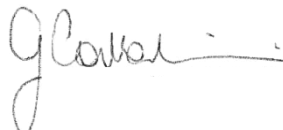


Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Sviluppo di un algoritmo per l'identificazione di risparmi conseguibili in un processo industriale attraverso l'analisi di dati provenienti dall'impianti"

Responsabile scientifico ENEA: Ing. Nicolandrea Calabrese



Responsabile scientifico Università di Padova: Ing. Cavazzini Giovanna



Indice

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | INTRODUZIONE | 4 |
| 2 | DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI..... | 5 |
| 2.1 | STRUTTURA GENERALE DEL SOFTWARE..... | 5 |
| 2.2 | MOTORI AD ALTA EFFICIENZA..... | 10 |
| 2.2.1 | <i>Applicazione dell’algoritmo ad un caso reale</i> | 15 |
| 2.3 | CALDAIE AD ALTA EFFICIENZA | 19 |
| 2.3.1 | <i>Applicazione dell’algoritmo ad un caso reale</i> | 23 |
| 3 | CONCLUSIONI..... | 25 |
| 4 | RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI | 26 |
| | APPENDICE..... | 27 |
| A1. | STIMA DEI RISPARMI E DEI TITOLI DI EFFICIENZA ENERGETICA CONSEGUIBILI DA INTERVENTI DI SOSTITUZIONE DI MOTORI ELETTRICI 27 | |
| A2. | STIMA DEI RISPARMI E DEI TITOLI DI EFFICIENZA ENERGETICA CONSEGUIBILI DA INTERVENTI DI SOSTITUZIONE DI CALDAIE CON CALDAIE AD ALTA EFFICIENZA | 30 |
| A3. | TECNOLOGIE EFFICIENTE A POTENZIALE APPLICATIVO NEL SETTORE INDUSTRIALE..... | 33 |
| A4. | CV DEL GRUPPO DI LAVORO IMPEGNATO NELL’ATTIVITÀ DEL PROGETTO..... | 39 |

1 Introduzione

Fu alla Fiera di Hannover del 2011 in Germania che si sentì parlare per la prima volta di “Industrie 4.0”, un concetto che indicava chiaramente la necessità di far evolvere il settore industriale verso un’industria “smart” automatizzata e interconnessa in tutti i suoi aspetti, dal manufacturing al planning, grazie ad un impiego sempre più pervasivo di dati, tecnologie computazionali e sistemi intelligenti di produzione e gestione degli impianti industriali.

E’ proprio in questo ambito che si inserisce questo progetto di ricerca il cui fine ultimo è quello di contribuire allo sviluppo di una piattaforma on-line che consenta ad un’azienda di monitorare i flussi energetici del proprio impianto in modo “smart” e di valutare in modo puntuale ma automatizzato, tramite software dedicati all’efficienza energetica e customizzabili sulle caratteristiche operative dei propri processi produttivi e dei propri macchinari, la fattibilità tecno-economica di interventi di efficientamento.

L’implementazione sistematica di interventi di efficienza energetica nel settore industriale consentirebbe infatti non solo di ridurre significativamente i consumi di energia con conseguenti ricadute positive a livello ambientale, ma anche di aumentarne la competitività grazie alla diminuzione dei costi di produzione. Nonostante siano disponibili sul mercato tecnologie ad alta efficienza, il grado di penetrazione nel settore industriale è per molte di esse ancora basso o addirittura insignificante.

Questa difficoltà di penetrazione è sostanzialmente correlata alle seguenti barriere:

1. Mancanza di dati sui consumi effettivi con conseguente difficoltà nell’individuazione della baseline;
2. Mancanza di competenza ed esperienza delle aziende nel valutare i potenziali risparmi energetici conseguibili con le tecnologie disponibili;
3. Mancanza di informazione sull’esistenza stessa di alcune tecnologie.

Tra queste, una delle principali è sicuramente la mancanza di competenza ed esperienza delle aziende nel valutare i potenziali risparmi energetici conseguibili con le tecnologie disponibili applicate ai loro processi produttivi.

Uno strumento fondamentale per superare questa barriera è la possibilità di usufruire di una piattaforma on-line, che consenta di valutare in modo puntuale ma automatizzato la fattibilità tecno-economica di interventi di efficientamento con un approccio customizzabile sulle condizioni di reale efficienza del processo produttivo. E’ evidente che l’unico modo per offrire questa possibilità di “customizzazione automatizzata” è quello di sviluppare algoritmi che, pur mantenendo una struttura standardizzata, consentano di valutare le condizioni di reale efficienza dell’impianto sulla base di input propri del processo produttivo (pressioni e temperature di esercizio, fattori di carico, ecc..) e dello stato effettivo della tecnologia in esame (consumi, guasti, ecc..), input richiesti all’utente tramite opportune interfacce.

Un esempio è quello dei motori elettrici i quali nella pratica industriale possono subire riavvolgimenti per ripristinarli da guasti. Ogni riavvolgimento penalizza il rendimento del motore circa dell’1% ed è quindi di fondamentale importanza tenerne conto per valutare gli effettivi risparmi di energia elettrica conseguibili a seguito di interventi di sostituzione.

In questo progetto, dopo aver effettuato una disamina del panorama delle tecnologie efficienti disponibili sul mercato, ci si è focalizzati su due tecnologie note ma con una penetrazione ancora contenuta a livello industriale se comparata all’ampio e trasversale potenziale applicativo: motori elettrici e caldaie ad alta efficienza. Il problema della scarsa penetrazione di queste tecnologie è sentito anche dalla Comunità Europea che ha inserito, nel suo programma di finanziamento Horizon2020, call mirate a favorire la penetrazione delle tecnologie ad alta efficienza con priorità proprio ai motori ad alta efficienza e alle caldaie per la produzione di acqua calda e vapore (es. call EE-16- topic *Energy Efficiency - Work Program Secure, clean and efficient energy*).

Per ognuna di queste tecnologie sono stati sviluppati algoritmi che consentissero di valutare l’efficienza reale e attesa della tecnologia in esame customizzata sulle sue effettive condizioni di stato ed esercizio ma automatizzata tramite opportune correlazioni tecniche ed economiche. Tali algoritmi sono quindi stati implementati in un software il cui scopo è quello di effettuare in maniera rapida e automatizzata le analisi

quantitative necessarie alla valutazione delle possibili soluzioni di efficientamento. In sintesi, l'obiettivo finale è quello di disporre di uno strumento che assolva le seguenti funzioni fondamentali:

- Raccolta guidata dei dati di input mediante un'interfaccia semplice e immediata;
- Valutazione degli interventi di efficientamento energetico con specifico riferimento al caso in esame e analisi tecno-economica di prima stima;
- Redazione di una scheda di "output" in cui si fornisce la stima dei risparmi energetici ottenibili, la stima dei TEE ottenibili ed una prima analisi economica (stima dell'investimento, analisi costi-benefici) con eventuale identificazione della configurazione ottima nel caso di più configurazioni possibili.
- Valutazione preliminare su una scala da 0 a 10 dell'intervento da effettuare in termini di difficoltà realizzativa e convenienza economica.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Struttura generale del software

L'obiettivo di questo lavoro è stato quello di realizzare la struttura di base di un software che dovrà individuare gli interventi di efficientamento più adatti e fornirne un'analisi tecno-economica di prima valutazione cui dovrà necessariamente seguire uno studio approfondito.

Il software è costituito dalle seguenti sezioni:

- **Un'interfaccia di inserimento dei dati** (Figura 1)
Rappresenta uno strumento fondamentale in quanto deve guidare l'utilizzatore permettendo un facile e immediato inserimento di tutti i dati necessari all'analisi dei consumi del processo produttivo e alla valutazione customizzata delle possibili soluzioni tecnologiche di efficientamento. Poiché molto spesso, presso gli stabilimenti industriali, risulta difficile trovare tutte le informazioni richieste, è fondamentale che l'interfaccia richieda solo i dati strettamente necessari in modo conciso e flessibile. Fondamentali sono anche i controlli da effettuare su ogni dato che garantiscono di non poter inserire dati non corretti che darebbero errori in fase di esecuzione. Per ovviare a questo problema, si sono introdotti, dove possibile, menù a tendina che consentissero una scelta tra due o più proposte (numero di poli del motore, carico costante o variabile, ecc...).
- **Algoritmo di valutazione tecno-economica** (Figura 2):
E' la parte più importante e significativa del software in quanto strumento fondamentale per eseguire in maniera automatica e rapida un'analisi tecno-economica di prima approssimazione dell'intervento di miglioramento dell'efficienza energetica. Per ogni tecnologia considerata, l'algoritmo, partendo dai dati raccolti in input, verifica l'applicabilità della tecnologia stessa, effettua un'analisi tecnica di prima stima mirata alla previsione del risparmio energetico conseguibile ed esegue un'analisi economica dell'investimento, individuando la configurazione ottimale nel caso di più configurazioni possibili. In linea con quelli che sono gli obiettivi del software e i dati di input disponibili, l'analisi relativa all'applicazione della singola tecnologia, per quanto customizzata sulle condizioni di esercizio dell'azienda, deve essere comunque fatta, con adeguato margine di approssimazione, senza entrare nel merito dell'apparecchiatura che verrà installata né scendere in dettagli progettuali ed economici. Per questo, all'interno degli algoritmi relativi ai singoli interventi, è stato necessario inserire delle curve relative a parametri di prestazione delle tecnologie e voci di costo che ne fornissero una stima del valore in funzione dei parametri che maggiormente lo influenzano. Tali curve sono state costruite basandosi su dati statistici ricavati da cataloghi e offerte di costruttori, su dati di letteratura e di normative, cercando di ricostruire più fedelmente possibile la situazione di mercato attuale. Si deve inoltre sottolineare che, nella valutazione della sostenibilità tecno-economica dell'intervento, si è adottato un approccio cautelativo (es. rendimenti minimi attesi, ecc..) per evitare che gli inevitabili limiti di accuratezza, seppure marginali, portassero a sovrastimare i risparmi conseguibili.

| | | |
|---------------|-----------|------------|
| MOTORI | Azienda | a |
| | Progetto | a |
| | Operatore | a |
| | Revisione | a |
| | Data | 12/12/2016 |

ACQUISIZIONE DATI

Taglia **Pn** [kW]

Carico

Condizioni operative del motore a carico variabile
 Se la curva di carico della potenza non è nota, inserire solo le ore totali di lavoro, si assumerà un fattore di carico medio del 75%

| | |
|---------------------|--|
| Se variabile | |
| ore/anno al 100% | <input style="width: 80px;" type="text" value="800"/> |
| ore/anno al 75% | <input style="width: 80px;" type="text" value="3500"/> |
| ore/anno al 50% | <input style="width: 80px;" type="text" value="2000"/> |
| ore/anno al 25% | <input style="width: 80px;" type="text" value="550"/> |
| ore/anno tot | <input style="width: 80px;" type="text" value="6850"/> |

Condizioni operative del motore a carico costante

| | |
|--------------------|--|
| Se costante | |
| Fattore di carico | <input style="width: 80px;" type="text" value="0.75"/> |
| ore/anno tot | <input style="width: 80px;" type="text" value="6850"/> |

numero poli-Velocità nominale [rpm]

Classe di efficienza

Se la classe di efficienza non è nota, compilare i dati di targa

| | | | |
|--------------------|--------------------|--|-----|
| Dati di targa | Tensione nominale | <input style="width: 60px;" type="text" value="400"/> | [V] |
| | Corrente assorbita | <input style="width: 60px;" type="text" value="95.9"/> | [A] |
| Fattore di potenza | cosphi | <input style="width: 60px;" type="text" value="0.9"/> | [-] |

Numero di riavvolgimenti subiti dai motori

Numero di motori

Motore dotato di inverter

Prezzo energia elettrica [€/kWh]

Figura 1 Esempio di interfaccia grafica per l’inserimento dei dati di input riferito al caso di un intervento di efficientamento per la sostituzione di un motore con un motore di classe IE3 o IE4

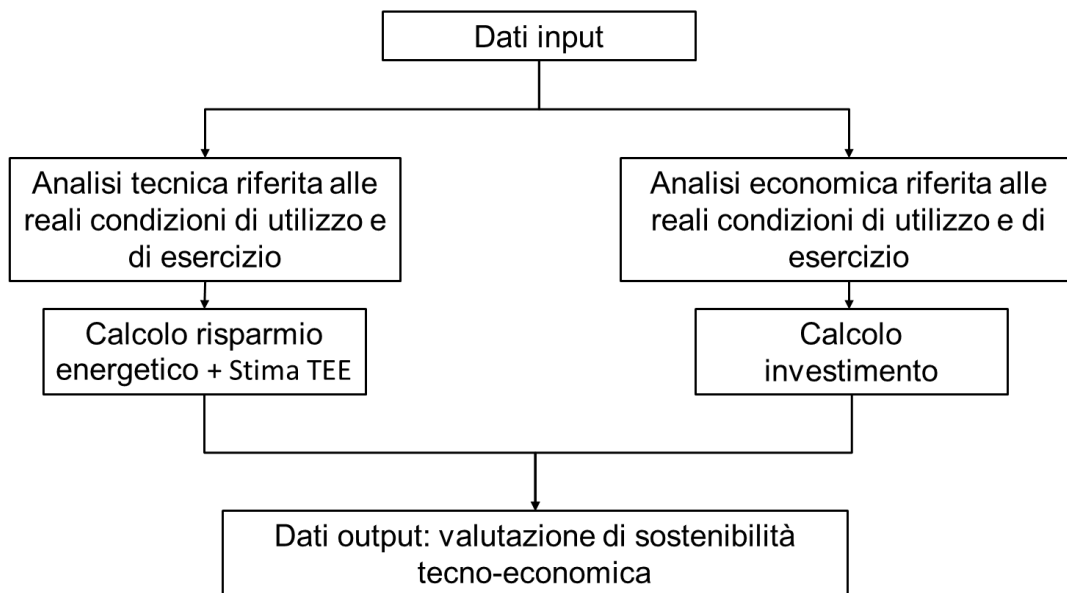


Figura 2 Schema semplificato di un algoritmo di stima

- **Output** (Figura 3):

I risultati delle analisi svolte dal software vengono forniti in una sezione di output in cui vengono riportati i principali risultati dell'analisi tecno-economica con indicazione dell'eventuale configurazione ottimale che consente di ottenere i migliori indici economici (es. motore di classe IE3 o IE4). In particolare vengono riportati i risultati dell'analisi dell'algoritmo in termini di stima dei risparmi di energia, dei Titoli di Efficienza Energetica conseguibili e gli indici economici risultanti: Tempo di Pay-Back (PB), Valore Attuale Netto (VAN), Tasso Interno di Rendimento (TIR), Costo dell'Energia Conservata o prodotta (CEC).

- **Valutazione** (Figura 4)

Tra gli output del software si è inserito anche un foglio riassuntivo in cui è riportata una valutazione complessiva della bontà dell'intervento basata su una votazione complessiva che può andare da 0 a 10. L'obiettivo di questa valutazione non è solo quella di fornire una prima e preliminare valutazione dell'intervento ma anche di definire un criterio di paragone tra diversi interventi di efficientamento che fornisca all'azienda una sorta di classifica di priorità di intervento. E' ovviamente uno strumento la cui utilità sarà più evidente quando si dovranno confrontare tra loro numerosi interventi di efficientamento con caratteristiche di investimento e di realizzazione tra loro non facilmente confrontabili (Appendice A3).

Proprio in quest'ottica, la votazione finale è ottenuta come somma di due contributi: una votazione "economica" che pesa per l'80% e una votazione "realizzativa" che pesa solamente per un 20%. In linea teorica, la votazione realizzativa dovrebbe rispecchiare la facilità di applicazione della tecnologia considerata all'interno dell'impianto specifico tenendo conto di numerosi fattori quali: la complessità della tecnologia stessa, la sua disponibilità sul mercato, l'impatto sulla produzione dei lavori di installazione, la situazione impiantistica specifica, la localizzazione dello stabilimento, le esigenze manifestate dall'azienda stessa. Non potendo disporre di questi dati di dettaglio nella fase di prima valutazione in cui si colloca il software, è stato scelto di assegnare un peso limitato alla componente realizzativa. Basandosi sulla gamma di tecnologie efficienti con potenziale applicativo individuate nella prima parte dell'attività, si sono quindi assegnati dei valori di default in base alla complessità della tecnologia in termini di progettazione, trasporto e installazione (decescente all'aumentare dell'impegno tecnologico, progettuale e impiantistico).

Ad esempio, viene assegnato un valore basso a interventi come il recupero termico mediante impianti ORC caratterizzati da una notevole complessità di progettazione e installazione, e un valore molto alto

ad interventi semplici, come gli inverter che possono essere solitamente installati con facilità sui motori elettrici presenti in qualsiasi impianto.

| MOTORI - OUTPUT | | Azienda | a |
|--------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------|
| | | Progetto | a |
| | | Operatore | a |
| | | Revisione | a |
| | | Data | 12-dic-16 |
| STIMA RISPARMI | | | |
| | Sostituzione con IE3 | Sostituzione con IE4 | |
| <i>Rendimento pre-intervento</i> | 93.32% | | - |
| <i>Rendimento post-intervento</i> | 94.49% | 95.68% | - |
| <i>Delta Rendimento</i> | 1.17% | 2.36% | - |
| <i>Consumo annuale pre</i> | 302,794 | | <i>kWh/anno</i> |
| <i>Consumo annuale post</i> | 299,044 | 295,333 | <i>kWh/anno</i> |
| <i>Risparmi elettrici</i> | 3,750 | 7,461 | <i>kWh/anno</i> |
| <i>Risparmio Energia primaria</i> | 0.70 | 1.40 | <i>tep/anno</i> |
| <i>Risparmio Economico</i> | € 562.43 | € 1,119.08 | €/anno |
| STIMA INCENTIVI | | | |
| | Sostituzione con IE3 | Sostituzione con IE4 | |
| <i>Risparmio Lordo</i> | 0.00 | 0.69 | <i>tep/anno</i> |
| <i>TEE generati</i> | 0.00 | 1.84 | <i>TEE/anno</i> |
| <i>Soglia superata?</i> | NO | NO | |
| ANALISI ECONOMICA | | | |
| | Sostituzione con IE3 | Sostituzione con IE4 | |
| <i>Investimento</i> | € 3,809.91 | € 4,381.40 | [€] |
| <i>Tempo di ritorno</i> | 6.77 | 3.92 | [anni] |
| <i>TIR</i> | -9% | 9% | [%] |
| <i>VAN (5 anni)</i> | -€ 1,359.19 | € 313.74 | [€] |
| <i>Indice di Profitto</i> | -0.357 | 0.072 | [-] |
| <i>Costo dell'Energia Conservata</i> | 0.24 | 0.14 | [€/kWh] |

Figura 3 Esempio di sezione di output riferito al caso di un intervento di efficientamento per la sostituzione di un motore con un motore di classe IE3 o IE4

| MOTORI - OUTPUT | | Azienda | a |
|------------------------|--|-----------|-----------|
| | | Progetto | a |
| | | Operatore | a |
| | | Revisione | a |
| | | Data | 12-dic-16 |

| Valutazione indicatori | | | |
|--|-------------------------|-------------------------|-------|
| 1. Aspetto economico (Investimento, PB, TIR, CEC) | | | |
| | Sostituzione con IE3 | Sostituzione con IE4 | |
| CEC | 0.241 | 0.139 | €/kWh |
| Controllo CEC > p_el | NO | SI | |
| Valutazione economica | 3.75 | 6.875 | |
| 2. Aspetto realizzativo (Facilità di implementazione) | | | |
| | Sostituzione con IE3 | Sostituzione con IE4 | |
| Valutazione realizzativa | 8.75 | 8.75 | |

| Valutazione complessiva | | | |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--|
| | Sostituzione con IE3 | Sostituzione con IE4 | |
| Valutazione globale | 4.75 | 7.25 | |

| Modalità di valutazione | |
|-------------------------|----------------------|
| >8 | Valutazione ottima |
| 6-8 | Valutazione buona |
| 4-6 | Valutazione discreta |
| 2-4 | Valutazione bassa |
| <2 | Valutazione scarsa |

| NOTE | |
|------|--|
| | |

Figura 4 Esempio di sezione di valutazione riferito al caso di un intervento di efficientamento per la sostituzione di un motore con un motore di classe IE3 o IE4

La componente che maggiormente pesa nella valutazione degli interventi è quella economica che assume un valore compreso tra 0 e 10 in funzione del valore dei tre parametri di valutazione economica dell'investimento individuati come più significativi: tempo di Pay-Back (PB), Investimento iniziale (I), Tasso Interno di Rendimento (TIR). Il contributo del TIR assume valore nullo se inferiore al tasso di

interesse (assunto pari al 6%), compreso tra 1 e 2 se compreso tra 6% e 30%, 2 se maggiore al 30%. Il peso associato a Pay-Back ed Investimento iniziale nella votazione economica viene fatto variare in funzione dell'entità dell'investimento poiché, evidentemente, al crescere dell'investimento iniziale cala la soglia decisionale di PB giudicata accettabile dall'investitore. Sono state individuate 5 fasce di investimento iniziale (0÷50'000 €, 50'000÷250'000 €, 250'000÷500'000 €, 500'000÷1'000'000 €, ≥1'000'000€) caratterizzate da un diverso peso dell'indicatore associato a PB ed I: per la prima fascia viene assegnato un voto compreso tra 0 e 4 al PB e compreso tra 0 e 2 ad I, mentre per l'ultima fascia il voto relativo al PB assume valore massimo 2 mentre quello relativo al I assume valore massimo 4. I contributi relativi a TIR, PB ed I vengono sommati ottenendo una votazione economica compresa tra 0 e 10. Sono stati imposti limiti massimi pari a 10 milioni di euro per l'investimento iniziale e 10 anni per il Pay-Back il cui superamento implica votazione economica nulla.

2.2 Motori ad alta efficienza

I motori elettrici rivestono un ruolo di primaria importanza nel settore industriale in quanto ad essi è associato circa il 75% dei consumi di elettricità del settore industriale, cioè circa 120 TWh, pari al 40% dell'intero fabbisogno elettrico nazionale.

Nonostante i motori di classe IE1 non siano più commercializzabili dal 16 giugno 2011 e nonostante sul mercato ci siano motori ad alta ed altissima efficienza (Figura 5) con risparmi di energia elettrica fino al 40-50%, il grado di penetrazione nel settore industriale è ancora contenuto con circa il 40% di motori di classe IE1 ed il 50% di classe IE2 (Figura 6) [1].

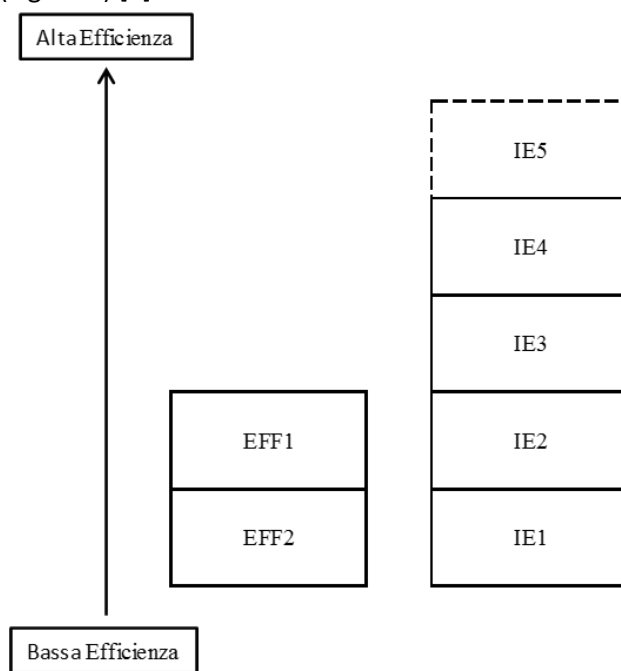


Figura 5 Vecchie (EFF1 ed EFF2) e nuove classi di efficienza (IE1-IE5), così come definite dalla norma internazionale IEC 60034-30. La corrispondenza tra le classi è indicativa. La nuova gamma di motori di classe IE5 è in fase di progetto da parte dei principali produttori e si pone l'obiettivo di ridurre le perdite di circa il 20% rispetto alla classe IE4.

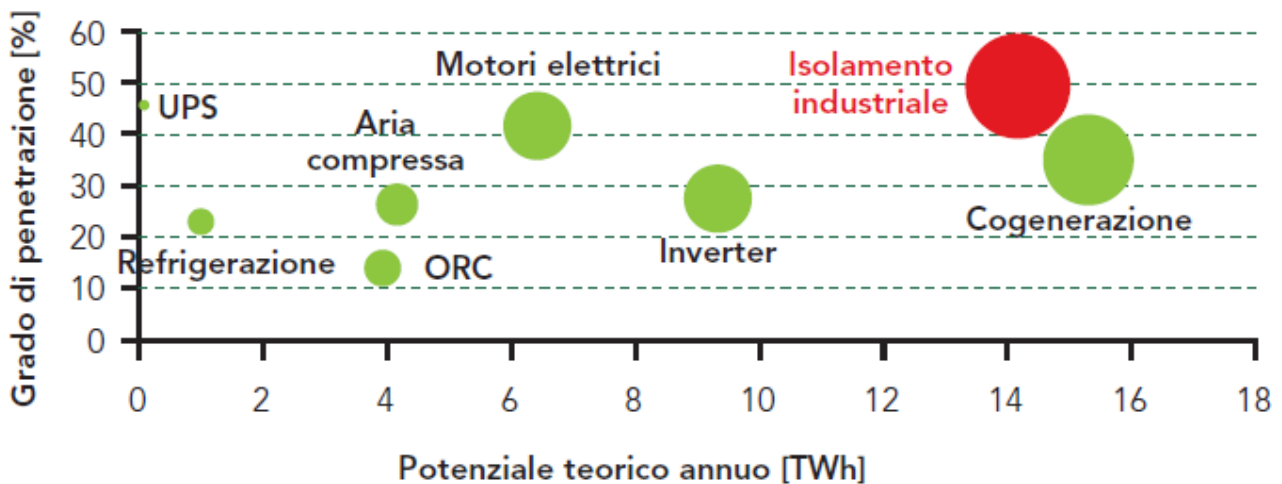


Figura 6 Grado di penetrazione in relazione al potenziale teorico annuo di alcune tecnologie ad alta efficienza disponibili sul mercato [2]

Se i motori installati a livello industriale fossero portati tutti almeno ad una classe di efficienza IE3, si otterrebbe un risparmio annuo di energia elettrica di circa 7 TWh (corrispondente a circa 17 milioni di apparecchi sostituiti).

Nonostante i numeri estremamente incoraggianti, si riscontra, non solo a livello italiano ma anche a livello europeo, una difficoltà di penetrazione di questa tecnologia che sembra essere legata principalmente alla mancanza di competenza delle aziende nel valutare la convenienza economica a sostituire un motore standard (classe IE1 e IE2) con uno ad alta efficienza (classe IE3 e IE4).

Energy savings at 50 Hz (4-pole motor)

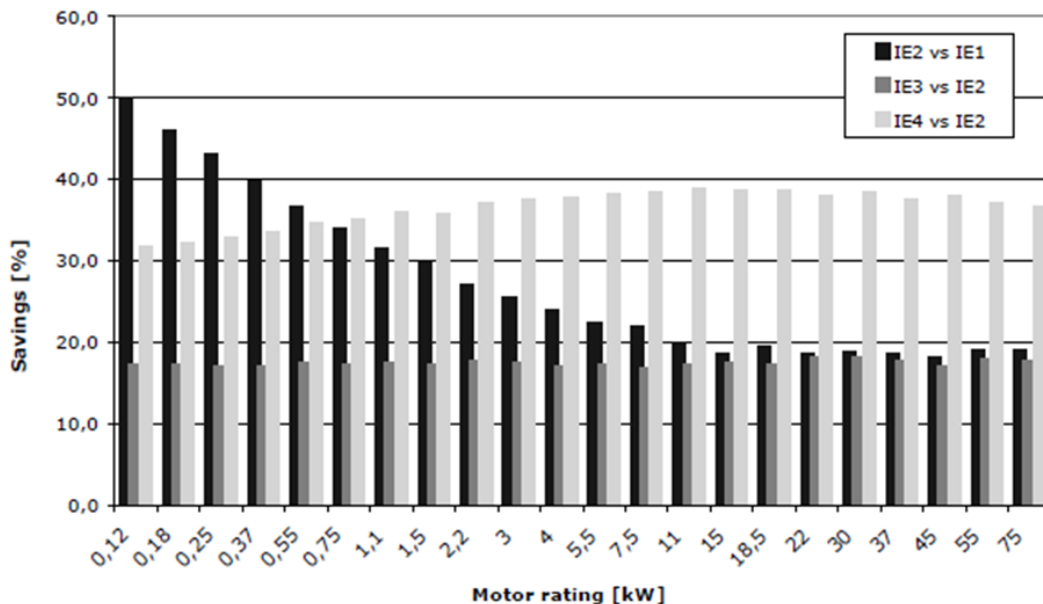


Figura 7 Potenziale risparmio di energia conseguibile sostituendo un motore elettrico con un altro a più elevata efficienza in funzione della taglia del motore

Tale convenienza infatti è strettamente correlata con i risparmi di energia elettrica conseguibili. Basti pensare infatti che una quota considerevole del *Total Cost of Ownership* (TCO¹) è rappresentata dal costo dell'energia consumata. Il costo di un motore elettrico è associabile infatti per il 97.7% al consumo di

¹ Il TCO tiene conto di tutti i costi associati ad un'apparecchiatura lungo l'intero ciclo di vita, opportunamente attualizzati per tener conto dei diversi istanti temporali in cui tali costi si verificano. Le voci di costo considerate sono: acquisto, installazione, energia, manutenzione.

energia elettrica, per l'1.5% alle spese di acquisto ed installazione e per lo 0.8% alle spese di manutenzione. In altri termini, il costo di un motore è mediamente paragonabile a quanto il motore stesso consuma in 3 mesi di lavoro.

La convenienza di sostituzione è però principalmente correlata a fattori di non sempre facile valutazione per le aziende come l'efficienza effettiva del motore installato, influenzata dall'età e da eventuali riavvolgimenti subiti dal motore, e l'efficienza attesa del motore sostitutivo nelle condizioni operative di esercizio dell'azienda.

A questo si deve poi aggiungere il vantaggio economico derivante dall'ottenimento di TEE, di altrettanto non facile valutazione per le numerose casistiche possibili nella definizione della "baseline" (valore di potenza, classe di efficienza di baseline, presenza o meno di inverter).

La complessità di valutazione rende più che evidente la necessità di sviluppare uno strumento che consenta alle aziende di effettuare queste valutazioni in modo automatico ma customizzato tramite l'inserimento di opportuni input correlati alla storia e alle condizioni di esercizio del motore o del gruppo di motori da sostituire.

Dati di Input

Nell'ottica di limitare la richiesta di dati a quelli strettamente necessari all'analisi, l'interfaccia per l'inserimento dei dati di input (Figura 1) richiede i seguenti dati:

- Caratteristiche del motore: potenza nominale, velocità nominale (o numero di poli), classe di efficienza, tipologia di funzionamento (carico costante o carico variabile), presenza di un inverter.
- Se la classe di efficienza non è nota, si chiede l'inserimento di tensione nominale di funzionamento, corrente assorbita e fattore di potenza ($\cos\phi$);
- Se il motore funziona a carico costante, vengono chiesti il fattore di carico ed il numero di ore annue di funzionamento;
- Se funziona a carico variabile, viene chiesto il numero di ore/anno al 100%, al 75%, al 50% e al 25% del carico;
- Numero di riavvolgimenti subiti dal motore;
- Il numero di motori aventi le stesse caratteristiche tecniche e lo stesso regime di funzionamento;
- Prezzo di acquisto dell'energia elettrica.

Dati di Output

Sulla base dei dati di input forniti, il software esegue una valutazione dell'intervento di sostituzione dei motori elettrici andando a valutare la sostituzione "ottimale" per ogni motore (o gruppo di motori uguali per caratteristiche e funzionamento), cioè la sostituzione con motore IE3 o IE4 che permette di avere il minor tempo di Pay-Back.

Il foglio di output presenta i risultati dell'analisi, tra cui il risparmio di energia elettrica annuo ottenibile, il numero di TEE annui conseguibili, il tempo di Pay-Back e il VAN dell'investimento (Figura 3). A questo si affianca anche una valutazione dell'intervento con votazione determinata a partire dai criteri precedentemente definiti (facilità di realizzazione e convenienza economica).

Ad esempio, supponiamo si voglia sostituire un motore elettrico da 55 kW di classe nota (IE2), privo di inverter, che lavora a carico costante ($f_c=0.75$) per 6850 ore/anno e che non ha mai subito riavvolgimenti a seguito di guasti. Una volta inseriti i dati di input, il software individua come soluzione ottimale la sostituzione con un motore di classe IE4, che consentirebbe di ottenere un risparmio di energia elettrica pari a 7,641 kWh/anno a fronte di un costo di investimento di circa 4400 €. Trattandosi di un investimento modesto con tempi di Pay-Back non elevatissimi (circa 4 anni), la valutazione complessiva dell'intervento è buona (7.25 su 10) in quanto la valutazione economica è abbastanza "buona" (6.875/10) e quella realizzativa è considerata di facile implementazione (votazione 8.75/10). Il software evidenzia anche che l'intervento non consentirà di ottenere Titoli di Efficienza Energetica in quanto non si riesce a superare la soglia incentivabile con la sola sostituzione di un motore.

Il software sarà facilmente integrabile/modificabile man mano che nuovi classi di efficienza verranno introdotte nel mercato così da mantenere aggiornata la possibilità di sostituzione con tutte le tipologie presenti sul mercato.

Stima dei risparmi e dei TEE conseguibili

Nota la classe di efficienza del motore, a partire dai valori minimi di efficienza a 50Hz definiti nello standard IEC 60034-30:2014, si sono determinate curve di interpolazione (Tabella 1 e Tabella 2), con un metodo di regressione ai minimi quadrati, e rendimenti di riferimento (Tabella 3) a seconda delle fasce di potenza installata del motore.

Tabella 1 Curve di interpolazione dei rendimenti per motori elettrici di taglia da 0.12 kW a 0.75 kW

| Classe efficienza | n° poli | a | b | c | Curva di interpolazione |
|-------------------|----------|---------|---------|---------|--|
| IE2, eff1 | 2 | -0.5935 | 0.8556 | 0.4608 | $\eta = a \cdot (P_n)^2 + b \cdot (P_n) + c$ |
| | 4 | 0.1113 | 0.8354 | - | $\eta = a \cdot \ln(P_n) + b$ |
| | 6 | -0.6829 | 0.9746 | 0.4089 | $\eta = a \cdot (P_n)^2 + b \cdot (P_n) + c$ |
| | 8 | -0.5455 | 0.8653 | 0.3155 | $\eta = a \cdot (P_n)^2 + b \cdot (P_n) + c$ |
| IE1 | 2 | -0.7594 | 1.0491 | 0.3553 | $\eta = a \cdot (P_n)^2 + b \cdot (P_n) + c$ |
| | 4 | 0.1192 | 0.7708 | - | $\eta = a \cdot \ln(P_n) + b$ |
| | 6 | -0.8464 | 1.2116 | 0.2617 | $\eta = a \cdot (P_n)^2 + b \cdot (P_n) + c$ |
| | 8 | -0.6274 | 0.9928 | 0.2154 | $\eta = a \cdot (P_n)^2 + b \cdot (P_n) + c$ |
| IE3 | 2 | 0.1078 | 0.8428 | - | $\eta = a \cdot \ln(P_n) + b$ |
| | 4 | 0.097 | 0.8642 | - | $\eta = a \cdot \ln(P_n) + b$ |
| | 6 | -0.7032 | 0.9177 | 0.4913 | $\eta = a \cdot (P_n)^2 + b \cdot (P_n) + c$ |
| | 8 | -0.8248 | 1.0554 | 0.415 | $\eta = a \cdot (P_n)^2 + b \cdot (P_n) + c$ |
| eff2 | generico | 1.013 | -0.1793 | -0.2319 | $\eta = a + b \cdot (P_n)^c$ |
| | 2 poli | 1.027 | -0.2031 | -0.2123 | $\eta = a + b \cdot (P_n)^c$ |
| eff3 | generico | 0.997 | -0.2413 | -0.3163 | $\eta = a + b \cdot (P_n)^c$ |
| IE4 | 2 poli | 0.0937 | 0.869 | - | $\eta = a \cdot \ln(P_n) + b$ |
| | 4 poli | 0.0853 | 0.8909 | - | $\eta = a \cdot \ln(P_n) + b$ |
| | 6 poli | -0.562 | 0.7459 | 0.5807 | $\eta = a \cdot (P_n)^2 + b \cdot (P_n) + c$ |
| | 8 poli | -0.526 | 0.6863 | 0.5609 | $\eta = a \cdot (P_n)^2 + b \cdot (P_n) + c$ |

Tabella 2 Curve di interpolazione dei rendimenti per motori elettrici di taglia da 0.76 kW a 199.99 kW

| Classe efficienza | n° poli | a | b | c | d | e | f | Curva di interpolazione |
|-------------------|----------|--------|---------|---------|-------|---------|---------|---|
| IE2, eff1 | 2 poli | 0.9954 | -0.2049 | -0.2919 | - | - | - | $\eta = a + b \cdot (P_n)^c$ |
| | 4 poli | 1.002 | -0.1932 | -0.2576 | - | - | - | |
| | 6 poli | 1.01 | -0.2353 | -0.2675 | - | - | - | |
| | 8 poli | -0.25 | -0.47 | 0.95 | - | - | - | |
| IE1 | 2 poli | 0.9844 | -0.2422 | -0.3312 | - | - | - | $\eta = a + b \cdot (P_n)^c$ |
| | 4 poli | 0.9844 | -0.2422 | -0.3312 | - | - | - | |
| | 6 poli | 1.004 | -0.2829 | -0.2934 | - | - | - | |
| | 8 poli | -0.29 | -0.47 | 0.942 | - | - | - | |
| IE3 | 2 poli | 0.9902 | -0.168 | -0.3158 | - | - | - | $\eta = a + b \cdot (P_n)^c$ |
| | 4 poli | 1.004 | -0.1671 | -0.2593 | - | - | - | |
| | 6 poli | 1.006 | -0.2015 | -0.2797 | - | - | - | |
| | 8 poli | -0.21 | -0.33 | 0.982 | - | - | - | |
| eff2 | generico | 1.013 | -0.1793 | -0.2319 | - | - | - | $\eta = a + b \cdot (P_n)^c$ |
| | 2 poli | 1.027 | -0.2031 | -0.2123 | - | - | - | |
| eff3 | generico | 0.997 | -0.2413 | -0.3163 | - | - | - | $\eta = a + b \cdot (P_n)^c$ |
| IE4 | 2 poli | 84.66 | 5.313 | -1.208 | 0.176 | -0.0071 | -0.0007 | $\eta = \frac{(a + b \cdot \ln(P_n) + c \cdot \ln(P_n)^2 + d \cdot \ln(P_n)^3 + e \cdot \ln(P_n)^4 + f \cdot \ln(P_n)^5)}{100}$ |
| | 4 poli | 86.763 | 4.264 | -1.067 | 0.250 | -0.0353 | 0.0019 | |
| | 6 poli | 84.181 | 4.970 | -1.120 | 0.289 | -0.052 | 0.0036 | |
| | 8 poli | 80.563 | 5.498 | -0.828 | 0.185 | -0.045 | 0.004 | |

Tabella 3 Rendimenti di riferimento per motori elettrici di taglia superiore ai 200 kW

| Classe efficienza | n° poli | eta |
|-------------------|----------|-------|
| IE1 | 2 | 0.940 |
| | 4 | 0.940 |
| | 6 | 0.940 |
| | 8 | 0.925 |
| IE2,eff1 | 2 | 0.950 |
| | 4 | 0.951 |
| | 6 | 0.950 |
| | 8 | 0.935 |
| IE3 | 2 | 0.958 |
| | 4 | 0.960 |
| | 6 | 0.958 |
| | 8 | 0.946 |
| IE4 | 2 | 0.965 |
| | 4 | 0.967 |
| | 6 | 0.963 |
| | 8 | 0.954 |
| eff2 | generico | 0.94 |
| eff3 | generico | 0.93 |

La scelta di adottare i rendimenti minimi da normativa è in linea con l’approccio cautelativo con cui è stato costruito il software. A parità infatti di classe di efficienza si possono trovare sul mercato motori con rendimenti diversi di uno o più punti percentuale a cui sono associati costi di investimento diversi. Al fine di evitare sovrastime di risparmi conseguibili derivanti da scelte imprenditoriali rivolte, per motivi di investimento, verso soluzioni tecnologiche di rendimento minimo (a parità di classe), si è deciso di cautelarsi adottando i valori minimi di rendimento per classe di efficienza.

Nel caso in cui non sia nota la classe di efficienza, è possibile comunque determinare il rendimento del motore da sostituire utilizzando la seguente correlazione che richiede come input i valori di tensione nominale, fattore di potenza e corrente assorbita:

$$\eta_{attuale} = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos \varphi}$$

dove P_n [kW] è la potenza nominale, V [V] è la tensione nominale ed I [A] è la corrente assorbita.

Al rendimento così calcolato per il motore da sostituire l’algoritmo applica un fattore correttivo dell’1% che tenga conto del decadimento di rendimento a seguito di riavvolgimenti del motore, pratica abbastanza diffusa in ambito industriale per ripristinare il motore dopo eventuali guasti. Le stesse correlazioni, dipendenti dalla classe di efficienza e dal numero di poli, definite per i motori installati, possono essere utilizzate anche per determinare il rendimento del motore sostitutivo, senza ovviamente nessun riavvolgimento da conteggiare.

Tali rendimenti vengono utilizzati per il calcolo dei risparmi conseguibili e gli eventuali titoli di efficienza energetica in base alla normativa (Appendice A1).

Per quanto riguarda invece i costi di investimento, la rielaborazione ed interpolazione di dati forniti dai costruttori ha consentito di ottenere le seguenti correlazioni per la stima del costo di un motore elettrico di classe IE3:

$$C = -0.09588 \cdot P_n^2 + 72.29 \cdot P_n + 124 \quad [€]$$

e di classe IE4:

$$\begin{cases} C = 2,30 \cdot (-0.09588 \cdot P_n^2 + 72.29 \cdot P_n + 124) \quad [€] & \text{se } P_n < 10kW \\ C = 1.15 \cdot (-0.09588 \cdot P_n^2 + 72.29 \cdot P_n + 124) \quad [€] & \text{se } 10kW \leq P_n < 75kW \\ C = (70.32 \cdot P_n - 52.072) \quad [€] & \text{se } P_n \geq 75kW \end{cases}$$

Come si è visto, per i motori di classe IE4 di potenza inferiore a 10 kW e compresa tra 10 e 75 kW, si sono moltiplicati i costi derivanti dalle interpolazioni dei motori IE3 per un fattore rispettivamente pari a 2.3 e 1.15.

Nel caso di più motori uguali per funzionamento e caratteristiche, l'investimento iniziale I necessario alla sostituzione si ottiene come:

$$I = C \times n_{mot} \quad [€]$$

Poiché i motori elettrici ad alta efficienza presentano un costo di manutenzione sull'intera vita tecnica dell'ordine del 1% del costo del motore stesso, rientrando quindi ragionevolmente nel margine di accuratezza delle correlazioni proposte, si è deciso di trascurare i costi di manutenzione nel calcolo dei flussi di cassa annui.

In base ai costi di investimento così determinati e ai ricavi derivanti dai risparmi di energia elettrica, valorizzati al prezzo di acquisto indicato dall'utente in fase di input, e dagli eventuali Titoli di Efficienza Energetica conseguibili, valorizzati al prezzo di 100 €/TEE, si è effettuata l'analisi economica dell'intervento con il calcolo degli indici economici solitamente utilizzati per questa tipologia di interventi (VAN, Pay-Back, Tasso Interno di Redditività, Indice di Profitto, Costo dell'Energia Conservata). Laddove necessario, l'analisi economica prende a riferimento, come valori di default, un tasso di interesse pari al 6% e un periodo di analisi di 5 anni, scelto come valore di default non solo perché equivalente al periodo di incentivazione ma anche perché orizzonte temporale adeguato per valutare investimenti a livello industriale.

2.2.1 Applicazione dell'algoritmo ad un caso reale

Per validare l'algoritmo, si è preso a riferimento un intervento di efficientamento del 2014 mirato alla sostituzione di 40 motori in un'azienda siderurgica con motori ad alta efficienza di classe IE3, di cui si possono riportare solo alcuni dati di riferimento per questioni di riservatezza.

Per tale intervento si avevano a disposizione rendimenti dei motori e fattori di carico medio effettivi determinati sulla base di una campagna di misura svolta presso l'impianto (Tabella 4), nonché un business plan dettagliato dell'investimento riassunto in Tabella 5.

Come si può notare dalla Tabella 5, l'intervento era stato pensato in chiave Esco con una condivisione del risparmio (90% per la Esco 10% per l'azienda) ed il trattenimento totale da parte della ESCo dei ricavi derivanti dalla vendita dei TEE. Nel business plan, i risparmi di energia elettrica erano stati valutati con riferimento al rendimento dichiarato dal costruttore. Il costo d'investimento comprendeva la spesa relativa ai nuovi motori elettrici (circa 218'000 €) ed i costi associati al monitoraggio dei consumi ante- e post-intervento. I TEE ottenibili erano stati valorizzati pari a 80 €/TEE mentre l'energia elettrica era stata valorizzata a 0.088 €/kWh secondo l'effettiva tariffa di fornitura dello stabilimento.

Inserendo nel software le caratteristiche e i dati di funzionamento dei 40 motori elettrici da sostituire ed impostando, come baseline per il calcolo dei TEE, il rendimento noto dei motori, si sono ottenuti i risultati riportati nelle Tabella 6 e Tabella 7.

Si fa presente che per avere un confronto equo tra i dati a disposizione ed i risultati del software si è forzato il software a limitare l'analisi alla sola sostituzione con motori IE3 e ci si è posti nelle medesime condizioni di valorizzazione dei risparmi e dei TEE ottenibili (prezzo dell'energia, prezzo e stima dei TEE secondo normativa del 2014, orizzonte di analisi, percentuale di condivisione, ecc..).

L'analisi di prima valutazione del software conferma un investimento con tempi di Pay-Back non brevissimi. Per quanto riguarda l'accuratezza dei risultati, si osserva che la stima dell'investimento di acquisto dei motori elettrici risulta essere affidabile con un errore del +5% rispetto al costo di acquisto reale dei nuovi motori (circa 218'000 €).

La stima del risparmio annuo di energia elettrica risulta essere cautelativa. Ciò è dovuto al fatto che il software, come già discusso, considera i rendimenti minimi per ogni nuovo motore, mentre i dati a disposizione facevano riferimento agli effettivi rendimenti dichiarati dal costruttore. Una differenza anche solo di un punto di rendimento per tutti e 40 i motori porta ad un aumento di risparmio conseguibile superiore ai 100'000 kWh/anno e giustifica così la differenza. Questo ovviamente si riflette negli indici economici con tempo di Pay Back e TIR cautelativamente sottostimati a causa dei minori risparmi calcolati.

Tabella 4 Elenco dei motori elettrici da sostituire con rendimenti e fattori di carico medi effettivi

| ID | Pn [kW] | Velocità nominale - n°poli | Fattore di carico | Rendimento effettivo % | Classe di efficienza |
|----|---------|----------------------------|-------------------|------------------------|----------------------|
| 1 | 55 | 1500 rpm - 4 poli | 0.98 | 92.48% | EFF2 |
| 2 | 55 | 1500 rpm - 4 poli | 1.03 | 92.52% | non nota |
| 3 | 55 | 1500 rpm - 4 poli | 1.00 | 92.50% | non nota |
| 4 | 132 | 1500 rpm - 4 poli | 0.74 | 94.19% | non nota |
| 5 | 110 | 1500 rpm - 4 poli | 0.89 | 94.25% | non nota |
| 6 | 110 | 1500 rpm - 4 poli | 0.89 | 94.25% | non nota |
| 7 | 75 | 1500 rpm - 4 poli | 0.88 | 92.22% | non nota |
| 8 | 75 | 1500 rpm - 4 poli | 0.86 | 92.21% | non nota |
| 9 | 75 | 1500 rpm - 4 poli | 0.87 | 92.22% | non nota |
| 10 | 37 | 1500 rpm - 4 poli | 0.61 | 90.50% | non nota |
| 11 | 37 | 1500 rpm - 4 poli | 0.76 | 90.92% | non nota |
| 12 | 45 | 1500 rpm - 4 poli | 0.33 | 89.95% | non nota |
| 13 | 37 | 1500 rpm - 4 poli | 0.42 | 88.75% | non nota |
| 14 | 37 | 1500 rpm - 4 poli | 0.43 | 88.93% | non nota |
| 15 | 37 | 1500 rpm - 4 poli | 0.43 | 88.92% | non nota |
| 16 | 37 | 1500 rpm - 4 poli | 0.43 | 88.92% | non nota |
| 17 | 75 | 1500 rpm - 4 poli | 0.67 | 91.88% | non nota |
| 18 | 75 | 1500 rpm - 4 poli | 0.67 | 91.90% | non nota |
| 19 | 75 | 1500 rpm - 4 poli | 0.67 | 91.88% | non nota |
| 20 | 75 | 1500 rpm - 4 poli | 0.67 | 91.89% | non nota |
| 21 | 75 | 1500 rpm - 4 poli | 0.67 | 91.88% | non nota |
| 22 | 160 | 1500 rpm - 4 poli | 0.83 | 94.49% | non nota |
| 23 | 160 | 1500 rpm - 4 poli | 0.83 | 94.49% | non nota |
| 24 | 160 | 1500 rpm - 4 poli | 0.83 | 94.49% | non nota |
| 25 | 160 | 1500 rpm - 4 poli | 0.83 | 94.49% | non nota |
| 26 | 160 | 1500 rpm - 4 poli | 0.83 | 94.49% | non nota |
| 27 | 160 | 1500 rpm - 4 poli | 0.85 | 94.56% | IE2 |
| 28 | 132 | 1500 rpm - 4 poli | 0.57 | 93.56% | non nota |
| 29 | 132 | 1500 rpm - 4 poli | 0.57 | 93.56% | IE2 |
| 30 | 160 | 1500 rpm - 4 poli | 0.85 | 94.56% | IE2 |
| 31 | 160 | 1500 rpm - 4 poli | 0.85 | 94.56% | IE2 |
| 32 | 90 | 1500 rpm - 4 poli | 0.74 | 91.77% | non nota |
| 33 | 90 | 1500 rpm - 4 poli | 0.76 | 91.84% | non nota |
| 34 | 90 | 1500 rpm - 4 poli | 0.72 | 91.68% | non nota |
| 35 | 75 | 1500 rpm - 4 poli | 0.49 | 92.91% | non nota |
| 36 | 75 | 1500 rpm - 4 poli | 0.57 | 93.41% | non nota |
| 37 | 90 | 3000 rpm - 2 poli | 0.88 | 93.21% | EFF2 |
| 38 | 90 | 3000 rpm - 2 poli | 0.88 | 93.21% | EFF2 |
| 39 | 90 | 3000 rpm - 2 poli | 0.88 | 93.21% | EFF2 |
| 40 | 37 | 1500 rpm - 4 poli | 0.68 | 90.78% | non nota |

Tabella 5 Dati di riferimento per l'intervento in esame

| | |
|---|--------------|
| Numero motori | 40 |
| Investimento [€] | 267'972.3 |
| Risparmio energia elettrica [kWh/anno] | 484'850 |
| TEE/anno | 152 |
| tipo TEE | tipo I |
| Tipologia intervento | a consuntivo |
| PB [anni] | 5.89 |
| TIR (con share 90%) su 10 anni | 9.2% |

Tabella 6 Risultati relativi all'intervento di sostituzione per singolo motore

| ID | Pn | velocità | fc | C [€] | R _{ei} [kWh] | TEE |
|----|-----|----------|------|------------|-----------------------|------|
| 1 | 55 | 1500 | 0.98 | 3'810.91 | 6956 | 1.99 |
| 2 | 55 | 1500 | 1.03 | 3'809.91 | 6745 | 1.97 |
| 3 | 55 | 1500 | 1.00 | 3'809.91 | 7026 | 2.03 |
| 4 | 132 | 1500 | 0.74 | 7'995.67 | 9122 | 2.94 |
| 5 | 110 | 1500 | 0.89 | 6'915.75 | 7399 | 3.07 |
| 6 | 110 | 1500 | 0.89 | 6'915.75 | 7399 | 3.07 |
| 7 | 75 | 1500 | 0.88 | 5'006.43 | 11535 | 2.26 |
| 8 | 75 | 1500 | 0.86 | 5'006.43 | 11315 | 2.21 |
| 9 | 75 | 1500 | 0.87 | 5'006.43 | 11404 | 2.24 |
| 10 | 37 | 1500 | 0.61 | 2'667.47 | 4996 | 0.92 |
| 11 | 37 | 1500 | 0.76 | 2'667.47 | 5419 | 1.14 |
| 12 | 45 | 1500 | 0.33 | 3'182.89 | 4157 | 0.58 |
| 13 | 37 | 1500 | 0.42 | 2'667.47 | 5341 | 0.63 |
| 14 | 37 | 1500 | 0.43 | 2'667.47 | 5265 | 0.65 |
| 15 | 37 | 1500 | 0.43 | 2'667.47 | 5276 | 0.65 |
| 16 | 37 | 1500 | 0.43 | 2'667.47 | 5276 | 0.65 |
| 17 | 75 | 1500 | 0.67 | 5'006.43 | 9914 | 1.72 |
| 18 | 75 | 1500 | 0.67 | 5'006.43 | 9847 | 1.72 |
| 19 | 75 | 1500 | 0.67 | 5'006.43 | 9914 | 1.72 |
| 20 | 75 | 1500 | 0.67 | 5'006.43 | 9881 | 1.72 |
| 21 | 75 | 1500 | 0.67 | 5'006.43 | 9914 | 1.72 |
| 22 | 160 | 1500 | 0.83 | 9'235.87 | 11751 | 3.83 |
| 23 | 160 | 1500 | 0.83 | 9'235.87 | 11751 | 3.83 |
| 24 | 160 | 1500 | 0.83 | 9'235.87 | 11751 | 3.83 |
| 25 | 160 | 1500 | 0.83 | 9'235.87 | 11751 | 3.83 |
| 26 | 160 | 1500 | 0.83 | 9'235.87 | 11751 | 3.83 |
| 27 | 160 | 1500 | 0.85 | 9'235.87 | 11436 | 3.93 |
| 28 | 132 | 1500 | 0.57 | 7'995.67 | 10047 | 2.27 |
| 29 | 132 | 1500 | 0.57 | 7'995.67 | 10047 | 2.27 |
| 30 | 160 | 1500 | 0.85 | 9'235.87 | 11436 | 3.93 |
| 31 | 160 | 1500 | 0.85 | 9'235.87 | 11436 | 3.93 |
| 32 | 90 | 1500 | 0.74 | 5'853.47 | 14670 | 2.19 |
| 33 | 90 | 1500 | 0.76 | 5'853.47 | 14748 | 2.25 |
| 34 | 90 | 1500 | 0.72 | 5'853.47 | 14663 | 2.13 |
| 35 | 75 | 1500 | 0.49 | 5'006.43 | 4761 | 1.26 |
| 36 | 75 | 1500 | 0.57 | 5'006.43 | 4155 | 1.47 |
| 37 | 90 | 3000 | 0.88 | 5'853.47 | 9959 | 2.6 |
| 38 | 90 | 3000 | 0.88 | 5'853.47 | 9959 | 2.6 |
| 39 | 90 | 3000 | 0.88 | 5'853.47 | 9959 | 2.6 |
| 40 | 37 | 1500 | 0.68 | 2'667.47 | 5088 | 1.02 |
| | | | | 230'175.50 | 365220 | 89.2 |

Tabella 7 Dati complessivi ottenuti dal software per l'intervento in esame

| | |
|--|--------------|
| Numero motori sostituiti | 40 |
| Investimento [€] | 230'175.5 |
| Risparmio in elettrica [kWh/anno] | 365'220 |
| TEE/anno | 89 |
| tipo TEE | tipo I |
| Superata la soglia minima di TEE? | Si |
| Tipologia intervento | a consuntivo |
| PB [anni] (con share 90%) | 6.72 |
| TIR (con share 90%) su 10 anni | 7.22% |

E' quindi possibile affermare che il software conferma l'approccio cautelativo a tutela delle aziende con cui è stato volutamente costruito, ed è complessivamente in grado di fornire un'indicazione preliminare abbastanza accurata della bontà dell'intervento con tempistiche e costi decisamente più contenuti rispetto all'elaborazione di un vero e proprio business plan, rimandato ad una fase successiva in caso di risultati positivi ottenuti dal software. Si fa inoltre presente che in un caso come questo di possibile sostituzione di più motori, l'analisi dei risultati forniti dal software potrebbe consentire la pianificazione di interventi ottimizzati dal punto di vista economico. Ad esempio, rimanendo al di sopra della soglia minima di TEE per ottenere l'incentivazione (pari a 60), si potrebbe ottimizzare l'intervento limitando la sostituzione ai motori che, presi singolarmente, hanno tempi di Pay Back inferiori ai 10 anni. In questo caso l'analisi porterebbe ad eliminare 2 motori, nello specifico i motori ID 35 e ID 36, riducendo l'investimento di circa 10,000€ ed aumentando il TIR a 7.66% (Tabella 8).

Tabella 8 Dati complessivi ottenuti dal software per la soluzione ottimizzata con riferimento sempre alla sola classe di efficienza IE

| | |
|--|--------------|
| Numero motori sostituiti | 38 |
| Investimento [€] | 220'162.64 |
| Risparmio in elettrica [kWh/anno] | 356'304 |
| TEE/anno | 86 |
| tipo TEE | tipo I |
| Superata la soglia minima di TEE? | Si |
| Tipologia intervento | a consuntivo |
| PB [anni] (con share 90%) | 6.58 |
| TIR (con share 90%) su 10 anni | 7.66% |

Se la stessa analisi invece fosse fatta oggi, con possibilità di scelta tra IE3 e IE4, con riferimento alla normativa attuale e ad un prezzo aggiornato dei TEE (100 €/TEE), la scelta del software cadrebbe su tutti motori di classe IE4, a cui risulterebbe associato un significativo aumento dei risparmi di energia elettrica (508'576 kWh/anno) in grado di compensare la riduzione dei TEE (73) dovuta alla variazione della baseline (IE3). Gli indici economici ne risulterebbero migliorati con Pay-Back inferiore ai 6 anni e tasso interno di redditività superiore all'11% (Tabella 9). In questo caso, tutti i motori risulterebbero caratterizzati da Pay-Back inferiori ai 10 anni e quindi andrebbero ad essere tutti sostituiti.

Altri criteri di selezione, sempre basati su indici economici, comporterebbero una riduzione dei TEE al di sotto della soglia minima di 60 e, per questo motivo, non sono stati presi in considerazione.

Tabella 9 Dati complessivi ottenuti dal software per la soluzione ottimizzata con riferimento possibilità di scelta tra IE3 e IE4

| | |
|-----------------------------------|--------------|
| Numero motori sostituiti | 40 |
| Investimento [€] | 260'803.62 |
| Risparmio in elettrica [kWh/anno] | 508'576 |
| TEE/anno | 73 |
| tipo TEE | tipo I |
| Superata la soglia minima di TEE? | Si |
| Tipologia intervento | a consuntivo |
| PB [anni] (con share 90%) | 5.57 |
| TIR (con share 90%) su 10 anni | 11.31% |

2.3 Caldaie ad alta efficienza

Un'altra tecnologia più che consolidata ma di bassa penetrazione nel sistema industriale è rappresentata dalle caldaie ad alta efficienza, annoverate dalla comunità europea assieme ai motori elettrici come tecnologie di cui è necessario favorire la penetrazione (Horizon2020 - Work Program *Secure, clean and efficient energy* - topic *Energy Efficiency*).

La struttura di questo secondo algoritmo ripercorre sostanzialmente quella sviluppata per i motori elettrici ad alta efficienza e prevede sempre una sezione input ed una sezione di output, comprensiva di una valutazione complessiva con votazione da 0 a 10.

Dati di Input

Dopo un'attenta analisi, si sono considerati adeguati a valutare le caratteristiche tecniche ed operative della caldaia in esame e facilmente reperibili i seguenti input (Figura 8):

- tipologia di caldaia attualmente installata;
- tipologia e prezzo di combustibile di alimento;
- pressione di esercizio a cui il fluido viene reso disponibile (per caldaie a tubi di fumo, istantanee o a tubi d'acqua);
- temperatura di esercizio per caldaie ad olio diatermico;
- tipologia di flusso in output: acqua calda o vapore;
- fattore di carico medio annuo;
- ore totali di funzionamento annue;
- potenza al focolare, potenza utile e rendimento nominale della caldaia da scheda tecnica.

Dati di Output

Sulla base dei dati di input forniti, il software esegue l'analisi tecno-economica dell'intervento di sostituzione della caldaia installata nonché una valutazione complessiva dell'investimento secondo i criteri e le modalità già visti per i motori elettrici.

La sezione di output del software riporta con riferimento alla medesima configurazione di partenza i risultati dell'analisi tecno-economica come ad esempio il risparmio annuale di combustibile ed il relativo risparmio economico, i Titoli di Efficienza Energetica ottenibili, il costo di investimento (comprensivo di costi di trasporto ed installazione), nonché i principali indici economici (VAN, Pay-Back, Tasso Interno di Redditività, indice di profitto e Costo dell'energia conservata). Un esempio della sezione di output è riportato in Figura 9.

Anche in questo caso, accanto ai risultati dell'analisi tecno-economica, si presenta anche una valutazione dell'intervento con votazione determinata con gli stessi criteri valutativi definiti nella sezione 2.1, basati sulla facilità di implementazione dell'intervento e sulla convenienza economica dello stesso.

| | | | |
|--------------------------------|--|------------------|-----------------|
| CALDAIE ALTO RENDIMENTO | | Azienda | Rossi srl |
| | | Progetto | Efficientamento |
| | | Operatore | GC |
| | | Revisione | 0 |
| | | Data | 15-set-16 |

| ACQUISIZIONE DATI | | | |
|--|------------|--|--|
| Dati di Input Impianto Termico | | | |
| * Combustibile di alimento | Fuel= | <input type="text" value="Gas naturale"/> | Prezzo combustibile <input type="text" value="0.35"/> [€/Sm ³] |
| * Tipologia di impianto | | <input type="text" value="A olio diatermico"/> | |
| * Pressione ingresso acqua in caldaia prima del degasatore | p_vap | <input type="text" value="12"/> | bar |
| Temperatura ingresso dell'olio in caldaia | Tolio | <input type="text" value="310"/> | °C |
| * Fattore di carico medio annuale | f_c= | <input type="text" value="0.75"/> | [-] |
| * Ore di funzionamento annue | H= | <input type="text" value="4500"/> | [h/anno] |
| * Flussi in Output | output | <input type="text" value="Acqua calda"/> | |
| * Rendimento nominale | eta_nom | <input type="text" value="88%"/> | - |
| * Potenza al focolare | P_focolare | <input type="text" value="5340"/> | [kW] |
| * Potenza termica Utile in uscita | P_utile | <input type="text" value="4700"/> | [kW] |

Figura 8 Interfaccia grafica per l’inserimento dei dati di input riferito ad un intervento di sostituzione di una caldaia

| | | | |
|--|--|------------------|-----------------|
| CALDAIE AD ALTO RENDIMENTO - OUTPUT | | Azienda | Rossi srl |
| | | Progetto | Efficientamento |
| | | Operatore | GC |
| | | Revisione | 0 |
| | | Data | 15-set-16 |

| DATI DI OUTPUT | | |
|----------------------------|-------------|-----------------------|
| | valore | u.m. |
| Consumo annuale pre | 13,884,000 | kWh/anno |
| Energia primari pre | 1,194 | tep/anno |
| Consumo annuale post | 12,972,460 | kWh/anno |
| Energia primari post | 1,116 | tep/anno |
| Risparmio di combustibile | 95,021 | Sm ³ /anno |
| Risparmio Energia primaria | 78 | tep/anno |
| Risparmio Economico | € 33,257.39 | €/anno |

| DATI INCENTIVI | | |
|------------------|--------|----------|
| | valore | u.m. |
| Risparmio Lordo | 52 | tep/anno |
| TEE generati | 175 | TEE/anno |
| Soglia superata? | SI | |

| DATI INVESTIMENTO | | |
|-------------------------------|--------------|----------------------|
| | valore | u.m. |
| Investimento | € 159,823.77 | € |
| Tempo di ritorno | 3.065 | anni |
| TIR | 19% | - |
| VAN (5 anni) | € 56,455.03 | € |
| Indice di profitto | 0.459 | - |
| Costo dell'energia conservata | 1.682 | [€/Sm ³] |

Figura 9 Sezione di output riferito al caso di un intervento di efficientamento per la sostituzione di una caldaia

| CALDAIE ALTO RENDIMENTO - VALUTAZIONE PROPOSTE | | Preparato | Rossi srl |
|--|----------------------|----------------------|-----------------|
| | | Controllato | Efficientamento |
| | | Approvato | GC |
| | | Revisione | 0 |
| | | Data | 15/09/2016 |
| Valutazione indicatori | | | |
| 1. Aspetto economico (Investimento, PB, TIR, CEC) | | | |
| CEC | 1.682 | [€/Sm ³] | |
| Controllo CEC > p_el | NO | | |
| Valutazione economica | 6.71875 | | |
| 2. Aspetto realizzativo (Facilità di implementazione) | | | |
| Valutazione realizzativa | 3.75 | | |
| Valutazione complessiva | | | |
| Valutazione globale | 6.125 | | |
| Modalità di valutazione | | | |
| <i>Valutazioni numeriche</i> | | | |
| >8 | Valutazione ottima | | |
| 6-8 | Valutazione buona | | |
| 4-6 | Valutazione discreta | | |
| 2-4 | Valutazione bassa | | |
| <2 | Valutazione scarsa | | |
| NOTE | | | |
| | | | |

Figura 10 Sezione di valutazione di un intervento di efficientamento per la sostituzione di una caldaia

Si sottolinea che la valutazione è utile non solo con riferimento al singolo intervento ma anche per confrontare interventi con caratteristiche di investimento e di realizzazione tra loro non facilmente confrontabili. Ad esempio, già solo dal punto di vista realizzativo, l'intervento di sostituzione di un motore elettrico è più facile rispetto alla sostituzione di una caldaia e quindi caratterizzato da una valutazione realizzativa più elevata (7.25 vs. 3.75 su 10). A questo si aggiungono poi costi di investimento decisamente superiori per le caldaie industriali rispetto ai motori elettrici. Ne consegue che a parità di Pay-Back, il maggiore costo di investimento peserà sulla valutazione economica dell'intervento. Tutti questi aspetti concorreranno a definire il voto finale per ciascun intervento e suggeriranno all'utilizzatore del software un ordine di priorità di intervento.

Stima dei risparmi e dei TEE conseguibili

Uno degli aspetti più importanti per la determinazione dei risparmi conseguibili con questa tipologia di intervento riguarda la stima delle prestazioni attese della caldaia di sostituzione. Tali prestazioni sono infatti strettamente correlate non solo alla configurazione impiantistica della caldaia di sostituzione, ma anche alle condizioni operative di esercizio del processo industriale in cui andranno ad essere inserite, come ad esempio pressioni di esercizio, temperature di esercizio e fattori di carico.

Per poter valutare la fattibilità techno-economica dell'intervento, in modo analogo ai motori, si sono costruite delle correlazioni per stimare i rendimenti attesi della caldaia con specifico riferimento alla configurazione impiantistica e alle condizioni operative di esercizio (pressioni e temperature di esercizio, fattore di carico), rendimenti utilizzati poi per il calcolo dei risparmi conseguibili secondo normativa. Partendo dai dati forniti da alcuni produttori di caldaie industriali relativi alle prestazioni in opportune condizioni di riferimento, tramite interpolazioni polinomiali, si sono ricavate in primo luogo curve di rendimento in funzione del fattore di carico, successivamente adimensionalizzate, dividendo per il rendimento massimo η_{max} della caldaia: $D_{rif} = (\eta/\eta_{max})_{rif} = f(fc)$ (Figura 11). La Tabella 10 riporta le correlazioni determinate, per varie tipologie di caldaia, sempre nelle condizioni di riferimento.

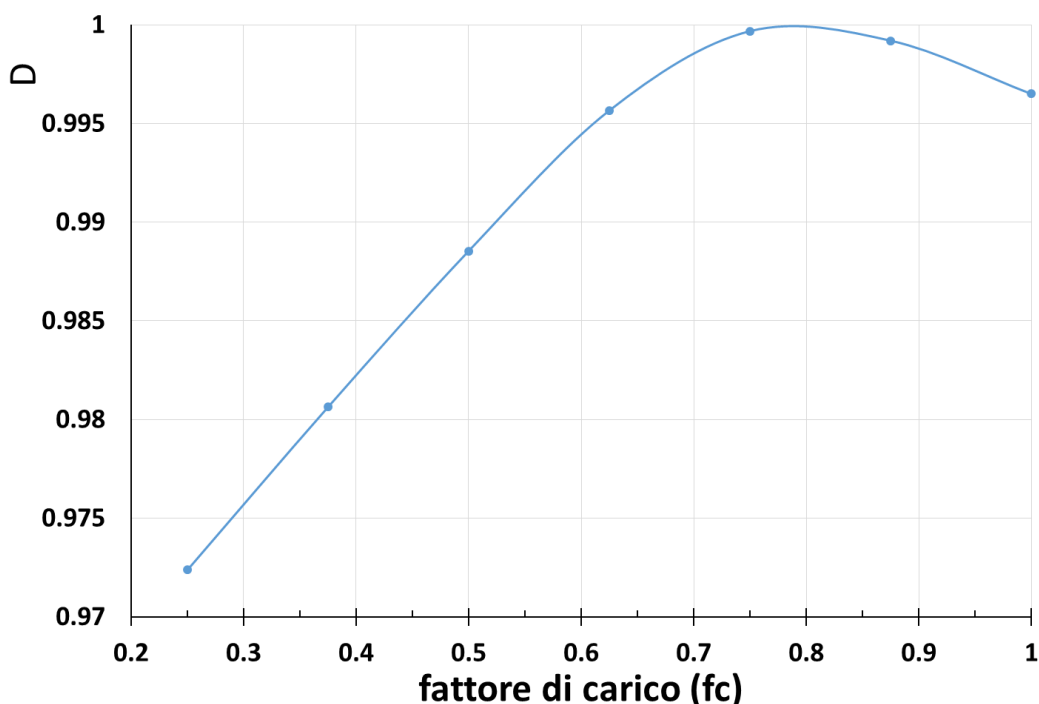


Figura 11 Esempio di curva adimensionalizzata $D_{rif} = (\eta/\eta_{max})_{rif} = f(fc)$ definita per le caldaie a tubi di fumo senza economizzatore nelle condizioni di riferimento

Tabella 10 Prestazioni delle varie configurazioni di caldaia nelle condizioni di riferimento e interpolazioni per il decadimento di prestazioni al variare del carico

| Tipologia costruttiva | $\eta_{fc=1}$ | η_{max} | $D_{rif} = (\eta/\eta_{max})_{rif} = f(fc)$ |
|---|---------------|--------------|--|
| A olio diatermico | 88.00% | 88.51% | $1.2621x^5 - 3.8485x^4 + 4.3734x^3 - 2.3666x^2 + 0.6784x + 0.8954$ |
| A olio diatermico con preriscaldatore aria comburente | 92.00% | 92.51% | $1.2075x^5 - 3.6821x^4 + 4.1843x^3 - 2.2642x^2 + 0.6491x + 0.8999$ |
| A tubi di fumo | 89.50% | 89.81% | $0.7601x^5 - 2.22x^4 + 2.3629x^3 - 1.1847x^2 + 0.3477x + 0.9305$ |
| A tubi di fumo con economizzatore | 94.50% | 94.81% | $0.7201x^5 - 2.1029x^4 + 2.2383x^3 - 1.1223x^2 + 0.3293x + 0.9342$ |
| Istantanea | 89.00% | 90.00% | $1.517x^5 - 4.5684x^4 + 5.1394x^3 - 2.7908x^2 + 0.8193x + 0.8723$ |
| Istantanea con preriscaldatore aria comburente | 91.00% | 92.00% | $1.4841x^5 - 4.469x^4 + 5.0277x^3 - 2.7302x^2 + 0.8015x + 0.8751$ |
| A tubi d'acqua | 90.50% | 90.81% | $0.7518x^5 - 2.1955x^4 + 2.3369x^3 - 1.1717x^2 + 0.3438x + 0.9313$ |
| A tubi d'acqua con economizzatore | 95.50% | 95.81% | $0.7125x^5 - 2.081x^4 + 2.2149x^3 - 1.1106x^2 + 0.3259x + 0.9349$ |

Per quanto riguarda le curve di rendimento a condizioni operative diverse, si sono definiti i seguenti fattori correttivi al variare della tipologia di caldaia e delle condizioni di esercizio reali:

- Per caldaie a tubi di fumo con o senza economizzatore e per caldaie a tubi di acqua con o senza economizzatore:
 - Riduzione di 0.5 punti percentuali per ogni incremento di 3 bar della pressione rispetto a quella di riferimento pari a 15 bar;
 - Aumento di 0.5 punti percentuali per ogni decremento di 3 bar della pressione rispetto a quella di riferimento pari a 15 bar.
- Per caldaie istantanee con o senza preriscaldatore dell'aria comburente:
 - Riduzione di 0.5 punti percentuali per ogni incremento di 2 bar della pressione rispetto a quella di riferimento pari a 7 bar;
 - Aumento di 0.5 punti percentuali per ogni decremento di 2 bar della pressione rispetto a quella di riferimento pari a 7 bar.
- Per caldaie ad olio diatermico con o senza preriscaldatore d'aria:
 - Aumento di 1.5 punti percentuali per ogni incremento di 50°C della temperatura dell'olio diatermico rispetto a quella di riferimento pari a 250°C;
 - Riduzione di 1.5 punti percentuali per ogni decremento di 50°C della temperatura dell'olio diatermico rispetto a quella di riferimento pari a 250°C.

Una volta definito il rendimento della caldaia di sostituzione con riferimento non solo alla configurazione impiantistica ma anche alle condizioni operative di esercizio del processo industriale in cui la caldaia andrà ad essere inserita, il calcolo dei risparmi conseguibili e gli eventuali titoli di efficienza energetica viene ad essere effettuato in base alla normativa (Appendice A2).

Per quanto riguarda invece i costi di investimento, tramite interpolazione di costi di impianto ottenuti dai produttori, si è determinata una correlazione che consentisse di stimare il costo della caldaia a partire dalla potenza nominale della caldaia $P_{n,baseline}$ espressa in kW:

$$C_{o_{impianto}} = 19.55 \cdot P_{n,baseline} [kW] + 31,072 \quad [€]$$

A questa funzione si è aggiunto un limite inferiore sotto la quale il costo viene fissato pari a 70'000 €.

A questo costo di impianto si aggiungono i costi di trasporto e di installazione della caldaia $C_{o_{tr e ins}}$ supposti pari al 30% del costo dell'impianto stesso.

In base ai costi di investimento così determinati e ai ricavi derivanti dai risparmi di energia elettrica, valorizzati al prezzo di acquisto indicato dall'utente in fase di input, e dagli eventuali Titoli di Efficienza Energetica conseguibili, valorizzati al prezzo di 100 €/TEE, si è effettuata l'analisi economica dell'intervento con il calcolo degli indici economici solitamente utilizzati per questa tipologia di interventi (VAN, Pay-Back, Tasso Interno di Redditività, Indice di Profitto, Costo dell'Energia Conservata). Laddove necessario, l'analisi economica prende a riferimento, come valori di default, un tasso di interesse pari al 6% e un periodo di analisi di 5 anni, scelto come valore di default non solo perché equivalente al periodo di incentivazione ma anche perché orizzonte temporale adeguato per valutare investimenti a livello industriale.

2.3.1 Applicazione dell'algoritmo ad un caso reale

L'intervento utilizzato per la validazione dell'algoritmo riguarda la sostituzione di due caldaie ad olio diatermico alimentate a gas naturale di potenza termica complessiva pari a 4652 kW, sostituite con una caldaia di potenza termica pari al complessivo delle due da sostituire (4700 kW). Le caldaie da sostituire sono state entrambe oggetto di un'analisi di combustione che ha determinato rendimenti pari circa all'88%. Anche in questo caso, per questioni di riservatezza, si possono riportare unicamente i dati principali dell'intervento progettato, utili alla validazione (Tabella 11).

L'intervento è stato realizzato precedentemente alla revisione del Regolamento Delegato (UE) 2015/2402 del 12 ottobre 2015 e quindi considerava il 90% come rendimento di riferimento tecnologico per caldaie alimentate a gas naturale. Per questioni di uniformità, anche il software è stato forzato a prendere il 90% come riferimento.

Tabella 11 Dati relativi ad un intervento reale di sostituzione di una caldaia

| | |
|--|-------------|
| Potenza termica alle utenze al 100% | 4.7 kW |
| Fattore di carico | 0.75 |
| Temperatura di esercizio dell'olio diatermico | 310 °C |
| Rendimento pre-intervento | 88% |
| Ore di funzionamento annue | 4500 h/anno |
| Prezzo combustibile | 0.35 €/smc |
| Costo di Investimento | 137'625€ |

I risultati dell'analisi effettuata tramite il software hanno dato buoni valori degli indici economici (Tabella 12) con un rendimento atteso del 94.31% nelle condizioni di esercizio del processo.

La valutazione complessiva, data da una bassa valutazione realizzativi (3.75 su 10) e da una buona valutazione economica (7.27 su 10) è risultata complessivamente abbastanza buona (6.56 su 10).

Tabella 12 Dati complessivi ottenuti dal software per l'intervento in esame

| | |
|--|----------------------------|
| Investimento [€] | 159'823.8 |
| Risparmio combustibile [Sm3/anno] | 111'402 |
| TEE/anno | 207 |
| Superata la soglia minima di TEE? | Si |
| Baseline calcolo TEE | situazione ante-intervento |
| Tipologia intervento | a consuntivo |
| PB [anni] | 2.6 |
| TIR | 27% |

Il costo di investimento stimato è risultato leggermente superiore al costo reale (159'824 € vs. 137'625 €). Per quanto riguarda l'esito dell'intervento, si avevano a disposizione i dati di consumo di combustibile ed energia termica prodotta nell'anno successivo all'intervento (Tabella 13). Questi dati hanno consentito di evidenziare un'ottima capacità del software di stimare il rendimento massimo effettivo di processo (94.38%). Tuttavia, a causa di un calo di produzione non prevedibile verificatosi, la produzione di energia termica utile nell'anno post-intervento (12'691 MWh) è risultata essere complessivamente inferiore del 40% rispetto a quanto atteso in fase pre-intervento (20'812 MWh), determinando così una variazione al ribasso dei risparmi rispetto a quelli attesi che non ha consentito una verifica a posteriore degli indici economici.

Tabella 13 Dati reali di consumo di combustibile ed energia termica prodotta post-intervento

| | Consumo gas naturale [Sm³] | Energia termica prodotta in caldaia [MWh] |
|-----------|--|--|
| Luglio | 146'580 | 1'133.7 |
| Agosto | 145'024 | 1'051.6 |
| Settembre | 147'867 | 1'119.2 |
| Ottobre | 155'248 | 1'359.1 |
| Novembre | 142'947 | 1'199.3 |
| Dicembre | 122'893 | 1'113.0 |
| Gennaio | 143'106 | 1'226.3 |
| Febbraio | 137'724 | 1'181.4 |
| Marzo | 148'389 | 1'235.4 |
| Maggio | 134'610 | 1'115.5 |
| Giugno | 113'120 | 956.9 |
| | 1'537'508 | 12'691.4 |

3 Conclusioni

L'obiettivo dell'attività è stato quello di realizzare la struttura di base di un software il cui compito ultimo sarà quello di individuare gli interventi di efficientamento più adatti allo specifico processo produttivo di un'azienda e fornire un'analisi tecno-economica di prima valutazione, customizzata sulle condizioni effettive di esercizio dell'impianto, cui dovrà necessariamente seguire uno studio approfondito.

Dopo una prima disamina del panorama delle tecnologie efficienti disponibili sul mercato, ci si è focalizzati su due tecnologie note ma con una penetrazione ancora contenuta a livello industriale se comparata all'ampio e trasversale potenziale applicativo: motori elettrici e caldaie ad alta efficienza.

Per ognuna di queste tecnologie sono stati sviluppati algoritmi che consentissero di valutare l'efficienza reale e attesa della tecnologia in esame, customizzata sulle sue effettive condizioni di stato ed esercizio ma automatizzata tramite opportune correlazioni tecniche ed economiche. Tali algoritmi sono quindi stati implementati in un software il cui scopo è quello di effettuare in maniera rapida e automatizzata le analisi quantitative necessarie alla valutazione delle possibili soluzioni di efficientamento.

In sintesi, le funzioni che il software è in grado di assolvere sono le seguenti:

- Raccolta guidata dei dati di input mediante un'interfaccia semplice e immediata;
- Valutazione degli interventi di efficientamento energetico con specifico riferimento al caso in esame e analisi tecno-economica di prima stima;
- Redazione di una scheda di "output" in cui si fornisce la stima dei risparmi energetici ottenibili, la stima dei TEE ottenibili ed una prima analisi economica (stima dell'investimento, analisi costi-benefici) con eventuale identificazione della configurazione ottima nel caso di più configurazioni possibili.
- Valutazione preliminare su una scala da 0 a 10 dell'intervento da effettuare in termini di difficoltà realizzativa e convenienza economica.

Il software così creato si inserisce quindi a pieno titolo tra gli strumenti di fondamentale importanza per far evolvere il settore industriale verso l'obiettivo di "Industria 4.0", cioè verso un'industria "smart" automatizzata e interconnessa in tutti i suoi aspetti, dal manufacturing al planning, grazie ad un impiego sempre più pervasivo di dati, tecnologie computazionali e sistemi intelligenti di produzione e gestione degli impianti industriali.

Per raggiungere un obiettivo così elevato, il software richiederà un ulteriore sviluppo sotto due punti di vista:

- Agli algoritmi sviluppati se ne dovranno aggiungere molti altri che dovranno prendere in considerazione l'ampia panoramica di possibili interventi di efficientamento che possono essere realizzati in un'azienda. In quest'ottica diventa di fondamentale importanza la valutazione preliminare dell'intervento, su scala generale da 0 a 10, che viene presentata assieme alla scheda di output per ogni intervento di efficientamento considerato. Tale valutazione è utile infatti non solo per valutare la convenienza del singolo intervento ma anche per confrontare interventi con caratteristiche di investimento e di realizzazione tra loro non facilmente assimilabili così da definire, in base al voto finale ricevuto dal singolo intervento, un ordine di priorità di intervento di fondamentale importanza che guiderà inevitabilmente il successivo processo decisionale ed operativo
- Il software dovrà anche essere integrato con un adeguato sistema di monitoraggio che fornisca in quasi real-time tutte le informazioni in merito a consumi e prestazioni del processo industriale in esame. Questo consentirà ad un'azienda di monitorare e controllare con continuità i flussi energetici del proprio impianto in modo "smart" e di valutare, in modo puntuale ma automatizzato tramite il software, non solo la fattibilità tecno-economica di tutti i possibili interventi di

efficientamento ma anche l'ordine di priorità di intervento. Consentirà inoltre anche di evidenziare eventuali anomalie di funzionamento dettate da guasti o da altre situazioni anomale.

Per verificare l'efficacia di questo tipo di piattaforma nel favorire l'efficientamento di un'azienda e la sua evoluzione verso il concetto di Industria 4.0, sarà anche necessario effettuare un periodo di sperimentazione in un vero e proprio contesto industriale. A questo proposito, per accelerare il processo di verifica sperimentale, si potrebbero integrare gli algoritmi ed il software, sviluppati in questo progetto, all'interno della piattaforma commerciale ETA, recentemente proposta sul mercato da AEM Acotel Engineering and Manufacturing e Bartucci SpA.

4 Riferimenti bibliografici

- [1] Energy and Strategy Group - Politecnico di Milano (2013) "Energy Efficiency Report", Milano, pp.113.
- [2] Energy and Strategy Group - Politecnico di Milano (2014). "Energy Efficiency Report", Milano.
- [3] ENEA (2012), "I Titoli di Efficienza Energetica - Cosa sono e come si ottengono i certificati bianchi alla luce della nuova Delibera EEN 9/11 - Guida Operativa 2", ENEA
- [4] Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea, "Regolamento delegato (UE) 2015/2402 della Commissione del 12 ottobre 2015"
- [5] Autorità per l'Energia Elettrica e per il Gas (AEEG) - Deliberazione 27 ottobre 2011 - EEN 9/11.

Appendice

A1. Stima dei risparmi e dei Titoli di Efficienza Energetica conseguibili da interventi di sostituzione di motori elettrici

Una volta stimati i rendimenti minimi del motore installato η_{att} e dei possibili motori sostitutivi (η_{IE3} , η_{IE4}) è possibile ricavare la stima dei risparmi energetici conseguibili tramite l'intervento.

Il consumo elettrico annuo nella situazione attuale (EN_{att}) è calcolato come:

$$EN_{att} = \frac{Pn \times fc \times h_{tot}}{\eta_{att}} \quad [kWh/anno]$$

I consumi elettrici previsti a seguito dell'installazione di un motore di classe IE3 e di classe IE4 sono calcolati come:

$$EN_{post_IE3} = \frac{Pn \times fc \times h_{tot}}{\eta_{IE3}} \quad [kWh/anno]$$

$$EN_{post_IE4} = \frac{Pn \times fc \times h_{tot}}{\eta_{IE4}} \quad [kWh/anno]$$

Il risparmio di energia elettrica ottenibile ($RISP_{el}$) dalla sostituzione del motore si ottiene come differenza tra consumo nella situazione ante-sostituzione e consumo post-sostituzione, moltiplicando per il numero di motori (n_{mot}) nel caso in cui si tratti di motori uguali per caratteristiche e funzionamento:

$$RISP_{el} = (EN_{att} - EN_{post}) \times n_{mot} \quad [kWh/anno]$$

Se si sceglie di utilizzare come baseline quella imposta da normativa [3], i Titoli di Efficienza Energetica ottenibili dipendono da quale motore si decide di installare (IE3 o IE4) e dalle caratteristiche tecniche e di funzionamento del motore che si sostituisce. In particolare:

Sostituzione del motore con un motore di classe IE3:

Se il motore lavora a carico costante:

- il motore ha potenza nominale $Pn \leq 7.5kW$:
i TEE ottenibili a seguito della sostituzione vengono calcolati secondo le modalità riportate nella scheda tecnica n. 30E. Dopo aver individuato il Risparmio Specifico Lordo (RSL) ed il numero di Unità Fisiche di Riferimento (UFR), che in questo caso è rappresentato da ogni kW di potenza nominale installata, il numero di TEE si calcola come:

$$TEE = RSL \times Pn \times n_{mot} \times \tau \quad [TEE/anno]$$

dove τ vale 2,65.

Trattandosi di un intervento di tipo standard, la dimensione minima che deve essere raggiunta è di 20 TEE.

- il motore ha potenza nominale $Pn \geq 7.5kW$:
non si ottengono titoli in quanto il risparmio di energia primaria è nullo essendo il motore IE3 la baseline:

$$RL_{IE3} = 0 \quad [kWh/anno]$$

$$TEE = 0 \quad [TEE/anno]$$

Se il motore lavora a carico variabile:

- Se il motore è dotato di inverter:

il risparmio di energia elettrica è calcolato come differenza tra il consumo elettrico post intervento ed il consumo elettrico di baseline con riferimento ad un motore di classe IE2 di medesima potenza nominale e numero di poli di quello esistente:

$$RL_{IE3} = \frac{Pn \times fc \times h_{tot}}{(\eta_{IE2} - \eta_{IE3})} \times n_{mot} \quad [kWh/anno]$$

dove η_{IE2} è il rendimento di un motore IE2 di uguale potenza nominale e numero di poli di quello sostituito.

Se il rendimento del motore sostituito η_{att} è maggiore del rendimento di baseline si calcola il risparmio come:

$$RL_{IE3} = \frac{Pn \times fc \times h_{tot}}{(\eta_{att} - \eta_{IE3})} \times n_{mot} \quad [kWh/anno]$$

La conversione da energia elettrica a energia primaria viene effettuata tramite il coefficiente di conversione, definito dai Decreti Ministeriali del 20 luglio 2004, pari a 0.187 tep/MWh. Pertanto i TEE ottenibili si ottengono come:

$$TEE = RL_{IE3} \times 0.000187 \times \tau \quad [TEE/anno]$$

dove τ vale 2.65.

Trattandosi di un intervento di tipo a consuntivo, la dimensione minima che deve essere raggiunta è di 60 TEE.

- Se il motore non è dotato di inverter:
non si ottengono titoli in quanto il risparmio di energia primaria è nullo essendo il motore IE3 la baseline:

$$RL_{IE3} = 0 \quad [kWh/anno]$$

$$TEE = 0 \quad [TEE/anno]$$

Sostituzione del motore con un motore di classe IE4:

Se il motore lavora a carico costante:

Il risparmio di energia elettrica è calcolato come differenza tra il consumo elettrico post intervento ed il consumo elettrico di baseline con riferimento ad un motore di classe IE3 di medesima potenza nominale e numero di poli di quello esistente:

$$RL_{IE4} = \frac{Pn \times fc \times h_{tot}}{(\eta_{IE3} - \eta_{IE4})} \times n_{mot} \quad [kWh/anno]$$

Se il rendimento del motore sostituito η_{att} è maggiore del rendimento di baseline vale:

$$RL_{IE4} = \frac{Pn \times fc \times h_{tot}}{(\eta_{att} - \eta_{IE4})} \times n_{mot} \quad [kWh/anno]$$

Dopo aver convertito l'energia elettrica in energia primaria, si può determinare il numero di TEE ottenibili come:

$$TEE = RL_{IE4} \times 0.000187 \times \tau \quad [TEE/anno]$$

dove τ vale 2.65.

Trattandosi di un intervento di tipo a consuntivo, la dimensione minima che deve essere raggiunta è di 60 TEE.

Se il motore lavora a carico variabile:

- il motore è dotato di inverter:
il risparmio di energia elettrica è calcolato come differenza tra il consumo elettrico post intervento ed il consumo elettrico di baseline con riferimento ad un motore di classe IE2 di medesima potenza nominale e numero di poli di quello esistente:

$$RL_{IE4} = \frac{Pn \times fc \times h_{tot}}{(\eta_{IE2} - \eta_{IE4})} \times n_{mot} \quad [kWh/anno]$$

dove η_{IE2} è il rendimento di un motore IE2 di uguale potenza nominale e numero di poli di quello sostituito.

Se il rendimento del motore sostituito η_{att} è maggiore del rendimento di baseline vale invece:

$$RL_{IE4} = \frac{Pn \times fc \times h_{tot}}{(\eta_{att} - \eta_{IE4})} \times n_{mot} \quad [kWh/anno]$$

Dopo aver convertito l'energia elettrica in energia primaria, si può determinare il numero di TEE ottenibili come:

$$TEE = RISP_{el-IE4} \times 0.000187 \times \tau \quad [TEE/anno]$$

dove τ vale 2.65.

Trattandosi di un intervento di tipo a consuntivo, la dimensione minima che deve essere raggiunta è di 60 TEE.

- Il motore non è dotato di inverter:
il risparmio di energia elettrica è calcolato come differenza tra il consumo elettrico post intervento ed il consumo elettrico di baseline con riferimento ad un motore di classe IE3 di medesima potenza nominale e numero di poli di quello esistente:

$$RL_{IE4} = \frac{Pn \times fc \times h_{tot}}{(\eta_{IE3} - \eta_{IE4})} \times n_{mot} \quad [kWh/anno]$$

dove η_{IE3} è il rendimento di un motore IE3 di uguale potenza nominale e numero di poli di quello sostituito.

Se il rendimento del motore sostituito è maggiore del rendimento di baseline vale:

$$RL_{IE4} = \frac{Pn \times fc \times h_{tot}}{(\eta_{att} - \eta_{IE4})} \times n_{mot} \quad [kWh/anno]$$

Dopo aver convertito l'energia elettrica in energia primaria, si può determinare il numero di TEE ottenibili come:

$$TEE = RL_{IE4} \times 0.000187 \times \tau \quad [TEE/anno]$$

dove τ vale 2.65.

Trattandosi di un intervento di tipo a consuntivo, la dimensione minima che deve essere raggiunta è di 60 TEE.

A2. Stima dei risparmi e dei Titoli di Efficienza Energetica conseguibili da interventi di sostituzione di caldaie con caldaie ad alta efficienza

A partire da potenza al focolare, ore di funzionamento e fattore di carico, si stimano i consumi annui in kWh/anno e di combustibile attraverso il potere calorifico PCI del combustibile usato.

$$C_{baseline} = P_{focolare} \cdot H \cdot fc \quad \left[\frac{kWh}{anno} \right]$$

$$C_{fuel} = \frac{C_{baseline}}{PCI} \quad \left[\frac{u. m.}{anno} \right]$$

A questi consumi si associano quelli di energia primaria calcolati come:

$$C_{primario} = C_{baseline} \cdot \frac{0.187}{1000} \quad \left[\frac{tep}{anno} \right] \text{ per caldaie alimentate ad energia elettrica}$$

$$C_{primario} = C_{baseline} \cdot \frac{0.086}{1000} \quad \left[\frac{tep}{anno} \right] \text{ per caldaie alimentate a combustibili}$$

Il calcolo della sostituzione con il nuovo generatore di calore viene effettuato a parità di configurazione di base (a tubi di fumo, istantanea, ad olio diatermico...) e di energia utile resa disponibile all'utenza che viene stimata tramite:

$$E_{utile} = P_{utile} \cdot H \cdot fc \quad \left[\frac{kWh}{anno} \right]$$

Per il nuovo generatore di calore viene determinato il rendimento nelle condizioni di riferimento in relazione al fattore di utilizzo medio annuale della caldaia utilizzando le curve adimensionali introdotte in Tabella 10:

$$\eta_{rif} = (\eta_{max})_{rif} \cdot D_{rif}$$

Si ricorda che la condizione di riferimento è data dalla pressione di 15 bar nel caso di caldaia a tubi di fumo, istantanea o a tubi d'acqua, e dalla temperatura di 250°C nel caso di caldaie ad olio diatermico.

Infine, in base alla tipologia di caldaia si effettua la correzione del rendimento η_{POST} legata alla pressione di esercizio (caldaia a tubi di fumo, istantanea e a tubi d'acqua) o alla temperatura dell'olio diatermico (caldaia ad olio diatermico) nella condizione reale di utilizzo.

Noto il rendimento post-intervento, si può quindi ricavare il consumo energetico in kWh/anno che si avrebbe dopo la sostituzione della caldaia e l'equivalente consumo di combustibile:

$$C_{POST} = \frac{E_{ut}}{\eta_{POST}} \quad \left[\frac{kWh}{anno} \right]$$

$$C_{fuel_post} = \frac{C_{POST}}{PCI} \quad \left[\frac{u. m.}{anno} \right]$$

convertibili in energia primaria tramite:

$$C_{primario_post} = C_{POST} \cdot \frac{0.187}{1000} \quad \left[\frac{tep}{anno} \right] \text{ per caldaie alimentate ad energia elettrica}$$

$$C_{primario_post} = C_{POST} \cdot \frac{0.086}{1000} \quad \left[\frac{tep}{anno} \right] \text{ per caldaie alimentate a combustibili}$$

Il risparmio di combustibile in Sm³/anno o in kg/anno si determina sottraendo i consumi della caldaia di partenza a quelli della caldaia a più alto rendimento:

$$RC = C_{fuel} - C_{fuel_POST} \quad \left[\frac{u. m.}{anno} \right]$$

Per quanto riguarda invece i titoli di efficienza energetica ottenibili, è necessario calcolare il risparmio netto di energia primaria RN :

$$RN = E_{prim,baseline} - C_{primario_POST} \left[\frac{tep}{anno} \right]$$

dove $E_{prim,baseline}$ e $C_{primario_POST}$ sono rispettivamente il consumo di energia primaria di baseline e quello stimato a seguito dell'intervento.

Il consumo di energia primaria stimato a seguito dell'intervento si ottiene dal consumo di combustibile in kWh/anno tramite opportuno fattore di conversione come spiegato in precedenza.

Per quanto riguarda invece il consumo di energia primaria di baseline, si valuta con la seguente relazione:

$$E_{prim,baseline} \left[\frac{tep}{anno} \right] = \frac{E_{utile}}{\max(\eta_{c,baseline}; \eta_{c,rif})} \left[\frac{kWh}{anno} \right] \cdot 0.086 \cdot 10^{-3} \left[\frac{tep}{kWh} \right]$$

dove:

- E_{utile} è l'energia utile richiesta alla caldaia per il processo in esame;
- $\eta_{c,baseline}$ è il rendimento della caldaia di baseline;
- $\eta_{c,rif}$ è il rendimento di riferimento [4] per la tecnologia ed il combustibile considerato (Tabella 14)

Tabella 14 Principali combustibili usati nei generatori di vapore con i relativi poteri calorifici inferiori e rendimenti di riferimento

| | Combustibile | PCI (H_u) | Rendimento di riferimento | |
|----------------|------------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------|
| | | | $\eta_{c,rif}$ | |
| | | | Vapore | Acqua Calda |
| Solidi | Carbone di legna | 6760 kcal/kg | 83.0% | 88.0% |
| | Lignite | 1925 kcal/kg | 81.0% | 86.0% |
| | Coke di petrolio | 8300 kcal/kg | 83.0% | 88.0% |
| | Rifiuti biodegradabili | 2500 kcal/kg | 75.0% | 80.0% |
| | Rifiuti non biodegradabili | 2165 kcal/kg | 75.0% | 80.0% |
| | Biomassa | 2500 kcal/kg | 81.0% | 86.0% |
| | Carbon fossile cokerie | 7000 kcal/kg | 83.0% | 88.0% |
| Liquidi | Gasolio | 10200 kcal/kg | 80.0% | 85.0% |
| | Olio Combustibile ATZ e BTZ | 9800 kcal/kg | 80.0% | 85.0% |
| Gassosi | Distillati leggeri | 10400 kcal/kg | 87.0% | 92.0% |
| | Gas di altoforno | 764 kcal/kg | 75.0% | 80.0% |
| | Gas di cokeria | 9556 kcal/kg | 75.0% | 80.0% |
| | Gas residui di raffineria | 12000 kcal/kg | 85.0% | 90.0% |
| | Gas di officina | 7167 kcal/kg | 75.0% | 80.0% |
| | Gas di discarica o residuati | 12000 kcal/kg | 75.0% | 80.0% |
| | Biogas | 3790 kcal/kg | 75.0% | 80.0% |
| | Gas naturale | 8250 kcal/Sm ³ | 87.0% | 92.0% |
| | GPL | 11000 kcal/kg | 87.0% | 92.0% |

Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.La necessità di considerare il massimo tra i due rendimenti deriva dalla necessità di epurare il risparmio di energia primaria dai risparmi energetici non addizionali, cioè da quei risparmi che si stima si sarebbero comunque verificati, anche in assenza di un intervento o di un progetto, per effetto dell'evoluzione tecnologica, normativa e del mercato", come richiesto dalla nuova Delibera EEN 9/11 [5].

Una volta determinato il risparmio di energia primaria RN, si calcola il numero di Titoli di Efficienza Energetica ottenibili tramite:

$$TEE = RN \cdot \tau$$

dove τ è il coefficiente di durabilità (pari a 3.36). Tali titoli di efficienza energetica possono essere valorizzati economicamente nell'analisi di sostenibilità economica solo se il loro numero supera il valore di soglia, pari a 60 per interventi di questo tipo.

A3. Tecnologie efficienti a potenziale applicativo nel settore industriale

La prima barriera alla penetrazione di tecnologie ad alta efficienza nel settore industriale è sicuramente la mancanza di informazione sull'esistenza stessa delle tecnologie.

La prima parte dell'attività si è quindi concentrata sulla creazione di una panoramica completa di tutte le potenzialità di efficientamento che il mercato mette a disposizione del settore industriale e non solo (Tabella 15). A tecnologie più note (caldaie ad alto rendimento, motori elettrici ad alto rendimento, impianti cogenerativi, ...) se ne affiancano altre non così rinomate in ambito industriale ma con potenziale applicativo, alcune delle quali sono qui sotto brevemente presentate.

Tecnologie di controllo avanzato (APC)

Un controllore avanzato è un algoritmo di controllo multivariabile predittivo vincolato che, attraverso delle operazioni eseguite ciclicamente manipola alcune variabili, chiamate variabili manipolate, per soddisfare dei vincoli su altre variabili, definite variabili controllate (Figura 12).

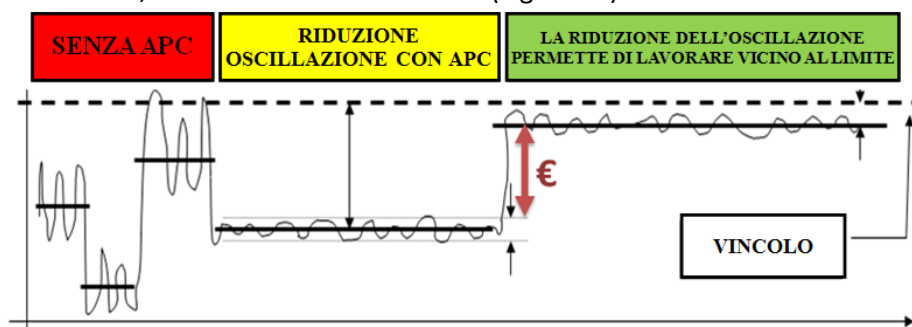


Figura 12 Schema di funzionamento APC

In generale gli obiettivi dei controllori avanzati riguardano la riduzione dell'errore di controllo delle variabili più critiche, il rispetto dei vincoli di processo e la minimizzazione dei costi di produzione. La riduzione dell'errore di controllo permette di stabilizzare le variabili più critiche consentendo di portare il processo verso i vincoli a più alta profittabilità che difficilmente vengono raggiunti costantemente attraverso il controllo manuale. Inoltre i controllori avanzati consentono una gestione dei disturbi di processo compensando in anticipo le perturbazioni che potrebbero inficiare le performance produttive.

Queste caratteristiche rendono le applicazioni di controllo avanzato estremamente robuste e consentono di rendere i processi produttivi altamente affidabili, efficienti e reattivi garantendo i target di produzione.

Settori di applicazione e ambiti d'intervento tipici per sistemi di controllo di questo tipo sono tutti i settori caratterizzati da processi particolarmente energivori quali: Cemento; settore Chimico, Petrochimico e Raffinazione; Alimentari; Generazione elettrica; Siderurgia; Vetro; Mattoni.

Un esempio applicativo di tale tecnologia è il progetto di un APC per controllare la fase di riscaldamento di un forno per billette di un'acciaieria che ha permesso un risparmio annuo del 5% e la riduzione dei costi energetici di circa 200mila €/anno senza modificare fisicamente il processo industriale ma solo la modalità con cui veniva gestito. Nell'ottobre 2015 tale progetto è stato premiato a livello nazionale con il premio *Energy Efficiency Award* indetto dal Centro Studi per l'Efficienza Energetica dell'Università Bocconi (CESEF).

Forni fusori ad alta efficienza

Nel processo di produzione dell'alluminio secondario è il processo di fusione ad avere i consumi energetici maggiori. Durante questo processo, tramite bruciatori alimentati a gas naturale, un bagno di alluminio fuso e rottame solido raggiunge una temperatura di circa 760°C, sufficiente a fondere l'alluminio. Una volta completata la fusione, il materiale defluisce nel vano di attesa e viene mantenuto allo stato liquido grazie ad altri bruciatori.

Nei forni fusori tradizionali (a crogiolo e a bacino) il materiale solido viene immesso direttamente nel forno senza essere preriscaldato.

Tabella 15 Tecnologie a potenziale applicativo in ambito industriale

| Tecnologia | Risparmi Potenziali | Settori applicativi |
|---|--|--|
| Tecnologie di controllo avanzato (APC) | A seconda dell'applicazione: - 5-10% Energia Elettrica - 5-10% Energia Termica | Industriale-Energivoro (Chimico, Petrolchimico, Siderurgico, Laterizi, Cemento, Carta, Vetro, Generazione elettrica, Alimentari ...) |
| Caldaie ad alto rendimento (>90%) | - 5-10% Energia Termica | Settori adoperanti fluidi di processo caldi (acqua, acqua surriscaldata, vapore, olio diatermico) Es. Alimentari, Distillerie, Chimica, Tessile, Carta ... |
| Centrali termiche a biomassa (cippato, Pellet Trucioli, segatura, corteccia, legno vecchio) | + Accesso a Incentivi (TEE, detrazioni fiscali, conto termici) - emissioni CO2 | Settori adoperanti fluidi di processo caldi (acqua, acqua surriscaldata, vapore, olio diatermico) Es. Alimentari, Distillerie, Chimica, Tessile, Carta ... Settore domestico |
| Cogenerazione - Motori a combustione interna | - Energia primaria (rispetto la produzione separata) | Settori industriali con richiesta termica pressoché costante durante l'anno Es. Alimentari, Distillerie, Chimica, Tessile, Carta Teleriscaldamento |
| Cogenerazione - Impianti Turbogas | - Energia primaria (rispetto la produzione separata) | Settori industriali con richiesta termica pressoché costante durante l'anno Es. Alimentari, Distillerie, Chimica, Tessile, Carta |
| Economizzatori | - Energia Termica (combustibile caldaia) | Settori adoperanti fluidi di processo caldi (acqua, acqua surriscaldata, vapore, olio diatermico) Es. Alimentari, Distillerie, Chimica, Tessile, Carta ... |
| Forni fusori ad alta efficienza | - Energia Termica (combustibile forno) | Settore Siderurgico (Produzione di Alluminio Secondario) |
| Brucciatori Recuperativi | - 10 - 30 % Energia Termica (combustibile bruciatore) | Settori in cui si hanno processi di combustione. Es. Vetro, Siderurgico, Petrolchimico, Alimentari... |
| Brucciatori Rigenerativi | - 30-60 % Energia Termica (combustibile bruciatore) | Settori in cui si hanno processi di combustione. Es. Vetro, Siderurgico, Petrolchimico, Alimentari... |
| Ossicombustione | - Energia Termica (combustibile bruciatore) | Settori in cui si hanno processi di combustione. Es. Vetro, Siderurgico, Petrolchimico, Alimentari... |
| Ricomprensione meccanica del vapore | - Energia primaria Fino a 80-90 % | Settore con processi di concentrazione di soluzioni. Es. Alimentari, produzione succhi, distillazioni, processi chimici-farmaceutici ... |
| Espansori volumetrici | + Energia Elettrica autoprodotta | Sostituzione di valvole di laminazione in industrie con reti di distribuzione del vapore (alimentari, chimico, ecc..) |
| Scambiatori per recupero calore di scarto | - Energia termica (combustibile caldaia) | Settori con disponibilità di calore di scarto (fumi o fluidi di processo) con utenze di calore a medio-bassa temperatura |
| Micro Cogenerazione (<50 kW) | - Energia primaria (rispetto la produzione separata) | Centri sportivi; Piscine; Ospedali; Hotel e Alberghi; Wellness e Spa; Grandi condomini |
| ORC a Bassa temperatura | + Energia Elettrica autoprodotta | Settori con disponibilità di calore di scarto (fumi o fluidi di processo) |
| Coibentazione industriale | - Energia primaria Riduzione dispersioni: - 50-70% processi caldi - 50% processi freddi | Settori con reti di distribuzione del caldo o freddo Es. Alimentari, Chimico-Farmaceutico, distillerie |
| Motori ad alta efficienza | - 4-8% Energia Elettrica | Tutti i settori industriali |
| Inverter su Ventilatori | - 10-20% Energia Elettrica | Tutti settori industriali |
| Pompe ad alta efficienza | -5-8% Energia Elettrica | Settori industriali con circuiti di circolazione d'acqua (siderurgico, vetro, cemento, laterizi, carta, alimentari...); trattamento acque reflue, Acquedotti e Reti Fognarie |
| Inverter su pompe | - 15-20 % Energia Elettrica | Settori industriali con circuiti di circolazione d'acqua (siderurgico, vetro, cemento, laterizi, carta, alimentari...) Trattamento acque reflue, Acquedotti e Reti Fognarie |
| Illuminazione | - 20 – 50% Energia Elettrica | Tutti i settori |
| UPS ad alta efficienza | - Energia Elettrica (consumi degli UPS) | Tutti i settori |
| Power Quality Improvement | - 6-12% Energia Elettrica | Tutti i settori |

Nel momento in cui questo materiale a temperatura ambiente entra in contatto con la lega liquida a 760 °C ne causa un brusco raffreddamento con conseguente segregazione dei componenti alto-fondenti e formazione di melme di fondo che penalizzano l'efficienza del forno stesso e la qualità del processo di fusione.

Per limitare i fenomeni di segregazione ed aumentare significativamente l'efficienza complessiva, si sono quindi recentemente proposti sul mercato i cosiddetti forni "a torre" (Figura 13).

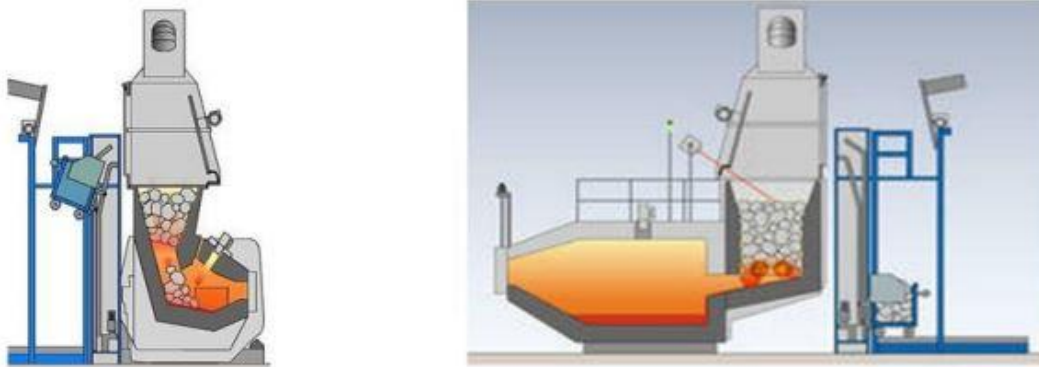


Figura 13 Sezione del forno a torre: camera fusoria (a sinistra) e camera d'attesa (a destra)

In questi forni la fase di carica avviene dall'alto attraverso un imbuto e con tempistiche controllate. Il materiale solido, durante la fase di discesa verso la camera di fusione, viene pre-riscaldato dal calore contenuto nei fumi di scarico, effettuando così un recupero termico che aumenta l'efficienza del forno. Inoltre, l'accesso del materiale dall'alto ha consentito di poter inclinare la base della camera fusoria così da favorire l'allontanamento immediato del metallo fuso dalla zona calda nella direzione del bacino di raccolta, separato e completamente indipendente, con notevoli benefici in termini di qualità del prodotto di fusione. La carica infatti fonde su di una superficie inclinata sulla quale scivola via. Le impurità e gli elementi alto fondenti, derivanti dagli scarti presenti nella carica, gli ossidi di alluminio rimangono intrappolati ottenendo quella che viene chiamata "filtrazione fusoria".

Questi forni quindi, oltre ad essere più efficienti di quelli tradizionali, consentono di ottenere prodotti di qualità ben più elevata.

Ricomprensione meccanica del vapore (RMV)

Molti processi industriali hanno l'esigenza di concentrare soluzioni facendo evaporare il solvente che, nella maggior parte dei casi, è acqua.

Questa operazione richiede una grande quantità di calore, trasferito alla soluzione mediante condensazione di vapore di rete saturo secco prodotto in apposite caldaie e distribuito mediante tubazioni negli evaporatori.

La tecnica della ricomprensione meccanica del vapore (RMV) è una elettro-tecnologia innovativa ad alta efficienza che consente di conseguire elevati risparmi di energia primaria (anche fino al 90%) rispetto agli impianti termici tradizionali di evaporazione multi-effetto (Figura 14).

Il vapore di processo ottenuto dall'evaporazione dell'acqua contenuta nel prodotto da concentrare viene compresso mediante un compressore di vapore che ne innalza, quindi, la pressione e la temperatura di vapore saturo. Questo vapore, valorizzato nel suo contenuto entalpico, viene reinviato all'evaporatore dove condensa ad una pressione più elevata di quella di processo e cede calore al prodotto liquido che così si concentra facendone evaporare l'acqua contenuta.

La RMV, con una limitata spesa energetica per la compressione del vapore di processo, consente il recupero termico del calore latente di evaporazione di tale vapore ricompresso, calore smaltito invece tramite un condensatore ausiliario negli impianti evaporativi tradizionali.

In un impianto a RMV il processo, una volta avviato, si autosostiene ed il consumo di vapore vivo da caldaia è limitato alle fasi di avviamento e a piccole integrazioni per sopperire alle dispersioni, senza necessità di acqua di raffreddamento in condensatori ausiliari.

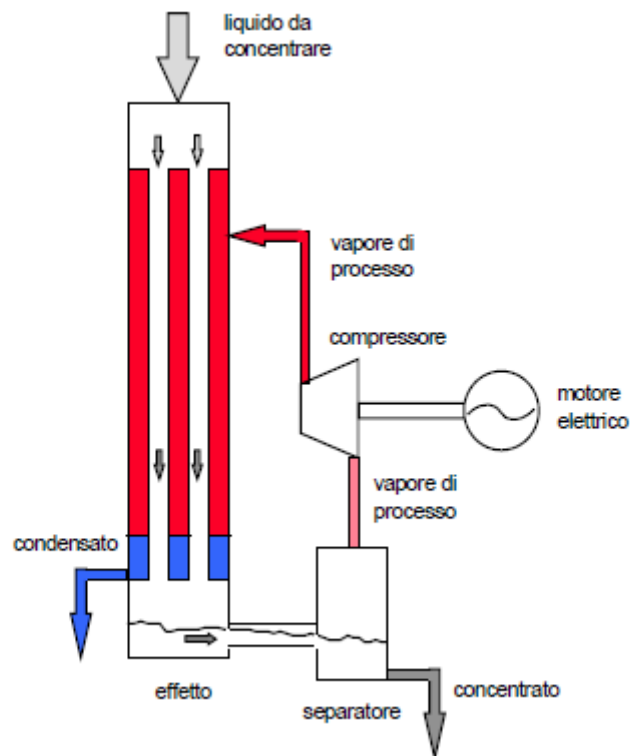


Figura 14 Schema di impianto di concentrazione a RMV a singolo effetto

Rispetto ai tradizionali sistemi di evaporazione a multi-effetto, i vantaggi principali della tecnologia RMV sono rappresentati da:

- Forte riduzione dei consumi di vapore e quindi dei costi di combustibile;
- Abbattimento pressoché totale dei consumi e dei costi di acqua di condensazione;
- Ridotto impatto ambientale, grazie alla drastica riduzione dei consumi di combustibile e di acqua ed alle ridotte emissioni gassose.

I settori di applicazione di maggiore interesse per la RMV sono i seguenti:

- Processi agro alimentari dove il concentrato è il prodotto finale (es. succo di frutta);
- Processi agro industriali dove il concentrato è il prodotto intermedio (siero di latte, mosto d'uva) o un refluo di processo da recuperare (acque di macerazione del mais);
- Processi industriali dove il prodotto è ciò che viene separato dal concentrato (acqua distillata, acqua pura per uso farmaceutico);
- Processi per lo smaltimento dei reflui industriali e civili dove il concentrato è adatto per il suo trattamento e/o distruzione (fanghi industriali da incenerire, percolati di discarica).

ORC a bassa temperatura

In genere un ciclo Rankine a vapore d'acqua è ritenuto adatto per sorgenti di calore ad alta temperatura (indicativamente tra 250°C e 600°C) e per grandi impianti centralizzati. Nei casi in cui si voglia sfruttare sorgenti di calore a bassa temperatura (sotto i 250°C) o si necessiti di una macchina di piccola taglia (<1MW) il ciclo a vapore risulta penalizzato ed economicamente poco sostenibile.

I fluidi organici, essendo caratterizzati da temperatura di ebollizione molto più basse dell'acqua si prestano meglio allo sfruttamento di calore a bassa temperatura (<250°C) e consentono quindi di sfruttare fonti di calore che altrimenti non sarebbero sfruttabili tramite tecnologie più tradizionali (energia geotermica, solare, biomassa, recuperi termici da flussi caldi industriali).

Oltre alle fonti di calore a bassa temperatura, per cui esistono sul mercato soluzioni commerciali, un potenziale applicativo ancora più significativo per gli ORC è rappresentato dalle fonti di calore a bassissima temperatura (<120°C) per cui però ci si trova ancora all'ambito della ricerca e sviluppo e di prototipazione pre-commerciale (Figura 15).

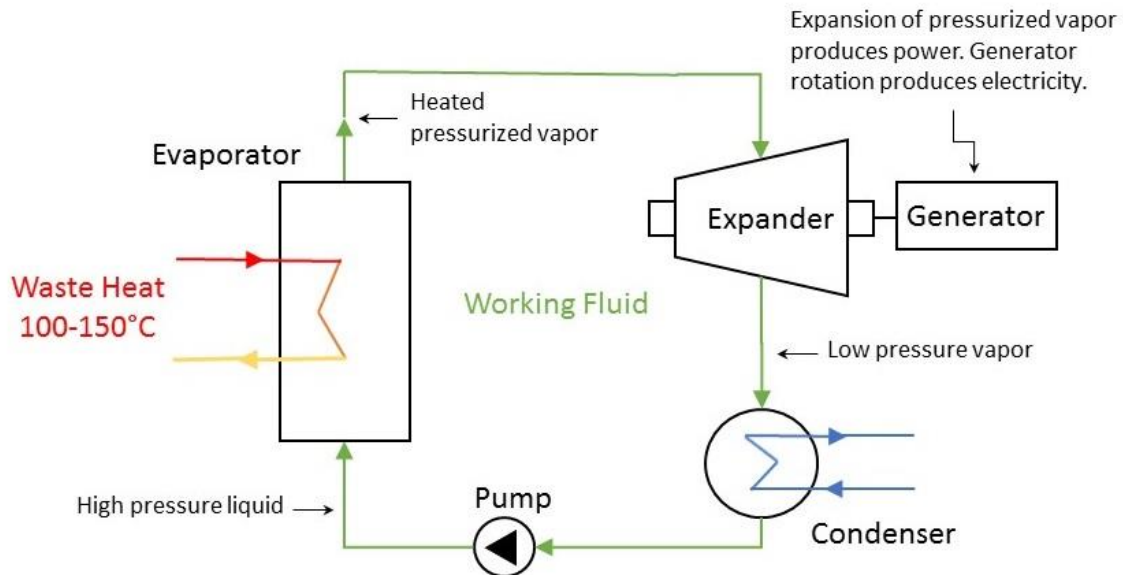


Figura 15 Ciclo ORC – Schema d'impianto

Oltre al settore delle rinnovabili e soprattutto nella generazione elettrica da biomassa in cui la tecnologia ORC ha avuto un'importante diffusione negli ultimi anni, in Italia esistono attualmente rare installazioni di questi impianti per il recupero di calore da processi industriali. Questo è dovuto non solo ai costi di investimento non trascurabili, ma soprattutto alla scarsa conoscenza dei vantaggi associati a questi sistemi. Secondo quanto riportato nel "Energy Efficiency Report 2012" pubblicato dal Politecnico di Milano, se si applicasse la tecnologia ORC a tutti i potenziali cascami termici dei principali settori industriali, si otterrebbe un potenziale teorico pari ad oltre 500MW elettrici, corrispondente ad una produzione annua di quasi 4 TWh pari a circa il 3% del fabbisogno elettrico nazionale. A causa però degli elevati costi di investimento degli ORC e della scarsa propensione attuale delle imprese verso questo tipo di iniziativa, è prevedibile una realizzazione del solo 10-20% del potenziale teorico di diffusione.

Power Quality Improver

Negli ultimi anni, nei reparti produttivi si sono diffusi carichi elettrici sensibili (computer, PLC, laser, schede elettroniche, robot), che spesso devono convivere con quelli disturbanti (azionamenti, saldatrici, presse, estrusori...).

Le aziende sono diventate sempre più sensibili alle problematiche di Power Quality per i danni alle apparecchiature che sbalzi di tensione od un elevato contenuto armonico possono indurre e per l'influenza negativa che possono avere sul processo produttivo o sulla qualità del prodotto risultante (Figura 16).

I Power Quality Improver sono dispositivi in grado di controllare ed equilibrare la tensione di alimentazione dei carichi elettrici.

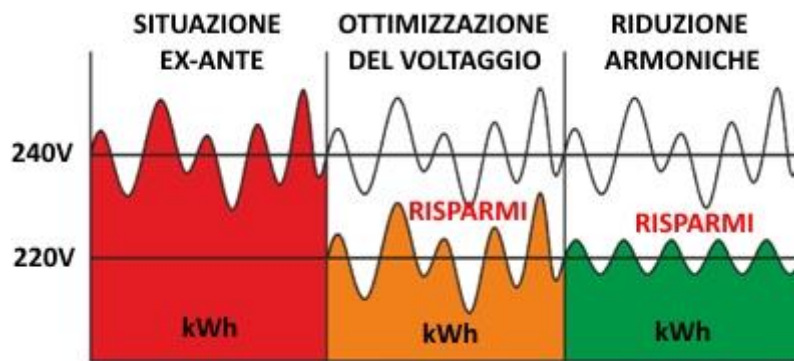


Figura 16 Esempificazione degli effetti dei Power Quality Logger

Tramite azioni di ottimizzazione del voltaggio e miglioramento della qualità dell'energia permettono di proteggere il sistema da variazioni e sbalzi di tensione così da renderne massima l'efficienza, limitando nel contempo anche gli stress termici ed elettrici.

A seconda delle caratteristiche dell'impianto (consumi, cicli di lavoro, fattori di potenza, distorsioni armoniche, ecc ...) le percentuali di risparmio possono variare dal 6% al 12%.

A4. CV del gruppo di lavoro impegnato nell'attività del progetto

Il gruppo di ricerca dell'Università di Padova, coinvolto nell'attività, è così composto:

Prof.ssa Giovanna Cavazzini, PhD, professore aggregato, titolare del corso di Macchine con Laboratorio per il corso di laurea in Ingegneria Meccanica e del corso di Motori a Combustione Interna per il corso di laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica all'Università di Padova, è autore di più di 70 pubblicazioni scientifiche la maggior parte delle quali su riviste internazionali dotate di Impact Factor e su congressi internazionali, nell'ambito dei quali ha ricevuto 4 Best Paper Award.

Ha partecipato a numerosi progetti di ricerca (Progetti di Ateneo, Bando del Ministero dell'Industria, contratti di ricerca, bando FSE) ricoprendo anche il ruolo di coordinamento. Ha ricevuto il premio come miglior progetto di ricerca inter-ateneo presentato nell'ambito del bando FSE 2016 in collaborazione con l'Università di Verona sull'efficientamento e la gestione ottimizzata di reti idriche.

Ha partecipato a numerosi contratti di ricerca con società industriali, ricoprendo anche il ruolo di Responsabile Scientifico.

Ha ottenuto l'incarico di Deputy Chair all'European Energy Research Alliance (EERA) con riferimento al sub-program "Mechanical Energy Storage", e ha numerose collaborazioni scientifiche con enti di ricerca nazionali (Università di Verona, RSE, CNR) ed internazionali (Pacific Northwest National Laboratory – USA; ENSAM – Francia; Jiangtsu University – Cina; Università Politecnica di Madrid – Spagna) e con aziende (General Electric – Francia).

E' membro dell'Editorial Board di due riviste internazionali, è stata revisore nell'ambito di programmi nazionali (VQR 2011-2014, PRIN 2016) ed internazionali (Horizon 2020) e svolge attività di revisore per numerose riviste internazionali, con due attestazioni di "Outstanding Contribution" per l'attività di revisione ottenute nel 2014 e nel 2015.

La sua attività di ricerca è incentrata sull'analisi ed ottimizzazione di cicli Rankine organici per il recupero di calore a bassa temperatura, sull'analisi di fattibilità tecno-economica relativamente all'implementazione di tecnologie innovative ad alta efficienza in processi industriali, sulla progettazione ed ottimizzazione di macchine a fluido e sulla gestione ottimizzata di impianti idroelettrici di accumulo. In particolare, ha posto l'attenzione sullo sviluppo di algoritmi per l'ottimizzazione delle prestazioni delle macchine, degli impianti per la conversione di energia e dei processi produttivi.

Prof. Guido Ardizon, professore ordinario, titolare dei corsi di Macchine 1 e Macchine 2 per i corsi di laurea triennale e magistrale in Ingegneria Meccanica all'Università di Padova, è autore di più di 110 pubblicazioni scientifiche, la maggior parte delle quali su riviste internazionali dotate di Impact Factor e su congressi internazionali, nell'ambito dei quali ha ricevuto 4 Best Paper Award.

Responsabile scientifico del Museo di Macchine "Enrico Bernardi" dell'Università degli Studi di Padova, è stato Direttore del Dipartimento di Ingegneria Meccanica, membro della Commissione Tecnica UNI "Pompe e Piccole Turbine Idrauliche", nonché revisore nell'ambito di programmi nazionali (VQR 2004-2010, PRIN, Futuro in Ricerca) e di progetti di ricerca finanziati da fondazioni private. Ha svolto attività di peer-review per numerose riviste e congressi internazionali.

E' stato responsabile scientifico di numerosi contratti di ricerca nell'ambito della progettazione ottimizzata di macchine a fluido finanziati da società industriali ed ha partecipato a numerosi progetti di ricerca, rivestendo anche il ruolo di Responsabile Scientifico. E' stato membro del Comitato Scientifico del Congresso Internazionale ECOS 2007.

La sua attività di ricerca è incentrata sulla progettazione ed ottimizzazione di macchine a fluido, sulla gestione ottimizzata di impianti idroelettrici, sullo sviluppo di algoritmi per l'ottimizzazione delle prestazioni delle macchine e degli impianti per la conversione di energia.

Prof. Giorgio Pavesi, PhD, professore associato, titolare del corso di Macchine per il corso di laurea triennale in Ingegneria dell'Energia e del corso di "Macchine per lo sfruttamento delle fonti rinnovabili" per il corso di laurea magistrale in Ingegneria Energetica all'Università di Padova, è autore di più di 110 pubblicazioni scientifiche, la maggior parte delle quali su riviste internazionali dotate di Impact Factor e su congressi internazionali, nell'ambito dei quali ha ricevuto 3 Best Paper Award.

E' stato visiting professor presso l'Università di Duisburg-Essen-Germania (2008, 2010, 2012), presso la Jiangsu University-Cina (2012-2013-2015) e presso il Von Karman Institute (2006). E' membro di due Commissioni IEC (International Electromechanical Commission), dell'Editorial Board di tre riviste internazionali e di numerosi Comitati Scientifici di congressi internazionali. E' Reviewer Organizer per il congresso ETC (European Turbomachinery Conference) ed è membro della società scientifica internazionale EUROTURBO – European Turbomachinery Society.

E' stato responsabile scientifico di numerosi contratti di ricerca nell'ambito della progettazione ottimizzata di macchine a fluido finanziati da società industriali. Ha partecipato a numerosi progetti di ricerca ed è stato anche Responsabile Scientifico e Coordinatore per l'Università di Padova di progetti finanziati dal MIUR (Industria 2015).

La sua attività di ricerca è incentrata sulla progettazione ed ottimizzazione di macchine a fluido, sull'ottimizzazione della gestione e delle prestazioni di impianti idroelettrici e di accumulo dell'energia e sull'analisi dell'instabilità operative nelle pompe-turbine.

Ing. Serena Bari è dottoranda in Ingegneria Energetica presso l'Università degli Studi di Padova e ricopre il ruolo di Research Manager presso Bartucci SpA nell'ambito del Programma di Dottorato in Alto Apprendistato.

SI è laureata in Ingegneria Energetica nel 2014 presso l'Università degli Studi di Padova con una tesi sull'ottimizzazione parametrica di un sistema ORC per recupero di calore a bassa temperatura svolta durante uno stage aziendale presso Bartucci SpA.

Ha vinto due assegni di ricerca (2014-2016), presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale, sullo sviluppo di configurazioni ottimizzate di ORC, basate sull'utilizzo di fluidi di lavoro convenzionali e non convenzionali, per il recupero di calore a bassa e bassissima temperatura.

Ha rivestito il ruolo di Specialist del Team Ricerca&Progetti di Bartucci SpA conducendo la propria analisi su temi riguardanti l'efficienza energetica in campo industriale, terziario e residenziale indagando la fattibilità tecnico economica di soluzioni strategiche trasversali quali recupero termico, inverter, ORC, controlli avanzati di processo.