

COMPRESSORI D'ARIA

IL REALE IMPATTO ECONOMICO E AMBIENTALE DERIVANTE DALL'APPLICAZIONE NEL SETTORE INDUSTRIALE DELL'ATTUALE STANDARD DI ANALISI DEL LIFE CYCLE COST

THE ORIGINAL ROTARY VANE

SOMMARIO

Oggi il metodo comunemente accettato per il calcolo del Life Cycle Cost (LCC) dei compressori d'aria industriali è messo fortemente in discussione, in quanto non bisogna dare per scontato che l'efficienza dei compressori sia costante durante tutta la loro vita operativa. Viene dimostrato come, in un compressore a vite, la piccolissima differenza di gioco assiale e interlobo si traduca in grosse perdite di prestazione e come queste rientrino perfettamente nell'usura accettabile dei cuscinetti utilizzati negli stessi compressori. Viene inoltre spiegato come in un compressore rotativo a palette Mattei ci sia un breve periodo di rodaggio della durata di circa 1000 ore, durante il quale sono stati misurati miglioramenti nelle prestazioni fino al 5%, sia con test eseguiti da Mattei in fabbrica sia con test eseguiti da terzi (INTERTEK USA). Con questi dati alla mano, vengono presentati calcoli del Life Cycle Cost decisamente più realistici per i compressori a vite e a palette, sottolineando come affidarsi a prestazioni verificate da CAGI a Zero Ore possa essere fuorviante per l'utilizzatore. Nell'esempio preso in considerazione, in un periodo di 10 anni prevedendo una revisione del compressore, un compressore con la stessa energia specifica a zero ore potrebbe registrare una differenza nel Life Cycle Cost di € 168,000. Viene anche dimostrato che, nel redigere nuove leggi per l'industria dell'aria compressa mirate a contenere la crisi del riscaldamento globale, adottare prestazioni a Zero Ore come indicatore di prestazione per l'intero Life Cycle, metterà a rischio gli obiettivi auspicati per la riduzione del consumo energetico nell'industria.

LIFE CYCLE COST E ARIA COMPRESSA INDUSTRIALE

Durante la produzione industriale il LCC è un metodo riconosciuto per simulare l'intero costo di proprietà per i beni strumentali. Il calcolo del Life Cycle Cost (LCC) per una macchina industriale varierà da settore a settore e in quello dell'aria compressa verrà generalmente calcolata tenendo in considerazione tre fattori principali.

Costo dell'investimento iniziale (Capex) – Qual'è il costo per l'acquisto della macchina? Se l'esercizio del calcolo del Life Cycle Cost (LCC) viene fatto per confrontare due compressori d'aria di marche concorrenti, questo comprenderà il solo costo del compressore (come in questo esempio). Se l'esercizio del calcolo dell'LCC viene fatto per calcolare il ritorno sull'investimento, dovranno essere presi in considerazione anche l'installazione e i costi secondari.

Costi di manutenzione ordinaria – Qual'è il costo per il mantenimento del macchinario? I costi dichiarati dal costruttore per eseguire una corretta manutenzione con l'utilizzo di materiale di consumo, compreso il costo della manodopera per la manutenzione.

Costi relativi al consumo energetico – Qual'è il costo per azionare la macchina? Una simulazione di quanto il compressore d'aria costerà nel suo funzionamento. Ciò dipende innanzitutto dalle prestazioni del compressore e viene normalmente misurato con il numero di kW necessari per comprimere 1 m³/min. di aria. Questo è conosciuto come Energia Specifica dei compressori. L'Energia Specifica può successivamente essere moltiplicata per la portata, le ore di funzionamento e il costo locale dell'energia elettrica per ottenere un costo totale per il funzionamento del compressore.

Mentre il costo di investimento iniziale (Capex) è fisso, sia i costi di manutenzione che quelli di funzionamento varieranno in funzione di un paio di fattori, quali ore di funzionamento annuali e costi locali dell'energia elettrica. Le simulazioni del calcolo del Life Cycle Cost (LCC) diventano sempre più frequenti quanto maggiore è la potenza installata del compressore e, più alta è la potenza installata, maggiori saranno le ore di funzionamento annuali.

Come esempio che utilizzeremo in queste pagine consideriamo un'installazione all'interno di una realtà industriale standard:

PARAMETRI DI INSTALLAZIONE	DATI	UNITÀ DI MISURA
Portata del compressore	15	m ³ /min
Energia specifica	6,0	kW/m ³ /min
Costo di acquisto	50.000	€
Costo di manutenzione	4.000	€/Yr
Ore di funzionamento	8000	hrs/Yr
Costo energetico	0,2	€/kWh

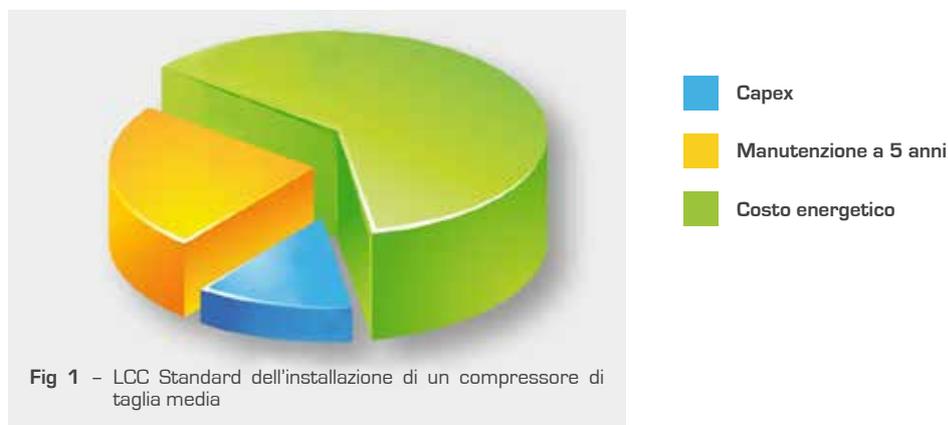
Tabella 1 - Esempio di parametri dell'installazione di un compressore d'aria di taglia media per la simulazione del Life Cycle Cost (LCC)

In questo esempio il Life Cycle Cost (LCC) per la durata di 5 anni del compressore viene calcolato nel modo seguente:

CENTRO DI COSTO LCC	METODO	COSTO	% COSTO
Capex	Costo acquisto compressore	€ 50.000	6%
Manutenzione a 5 anni	Costo manutenzione annuale per 5 anni	€ 20.000	3%
Costo energetico	En. Spec. x ore totali x portata x costo energetico	€ 720.000	91%
	Totale LCC	€ 790.000	100%

Tabella 2 - LCC standard dell'installazione di un compressore d'aria di taglia media

ESEMPIO DI LCC DI UN COMPRESSORE



In questo esempio il costo per il funzionamento del compressore è molto più alto della somma del costo di investimento iniziale (Capex) e dei costi di manutenzione, e rappresenta oltre il 90% del Life Cycle Cost (LCC) globale di questa installazione. L'importanza dell'Energia Specifica di un compressore è stata al centro dell'attenzione negli ultimi decenni a causa di questi altissimi costi di esercizio. Per questo motivo, molti produttori hanno investito i loro budget nella Ricerca e Sviluppo per il miglioramento dei propri prodotti. Sebbene la sfida per la riduzione del consumo di energia dei compressori sia stata normalmente dettata da aspetti commerciali, oggi i produttori di compressori devono fare i conti con il fatto che i loro prodotti possono compromettere direttamente l'ambiente per via del loro livello di efficienza energetica e possono essere tenuti a rispondere per tali prestazioni.

COMPRESSORI D'ARIA E RISCALDAMENTO GLOBALE

Oggi viene largamente accettato il fatto che il riscaldamento globale sia attualmente la più grande minaccia per il nostro pianeta e la sopravvivenza dell'umanità. Uno studio indipendente condotto da un Comitato Intergovernativo per i Cambiamenti Climatici conferma che l'attuale tasso di emissione di gas responsabile dell'effetto serra porterà inevitabilmente ad un riscaldamento che supererà di 4°C la temperatura globale media entro la fine del secolo [1]. Per chi non è del settore questo potrebbe non sembrare molto ma gli esperti concordano all'unanimità, che un aumento della temperatura di 2°C è il limite massimo per evitare danni irreversibili al sistema climatico e prevenire il crollo dei modelli socio-economici globali. Il 12 dicembre 2015, 195 nazioni a Parigi hanno approvato un accordo cardine sul clima, impegnandosi ad affrontare la crisi del riscaldamento globale con misure aggressive. Sebbene l'accordo di Parigi sia sicuramente un accordo storico, questo da solo non risolverà il problema del riscaldamento globale. La migliore delle ipotesi è che verranno ridotte le emissioni globali del gas effetto serra di circa la metà di quanto è necessario per evitare un aumento delle temperature globali di 2°C [2].

Uno dei maggiori fattori che contribuiscono all'emissione del gas effetto serra e quindi all'emergenza del riscaldamento globale è il consumo di energia elettrica globale. Segue una rappresentazione dettagliata del consumo di energia per settore [Fig 2].

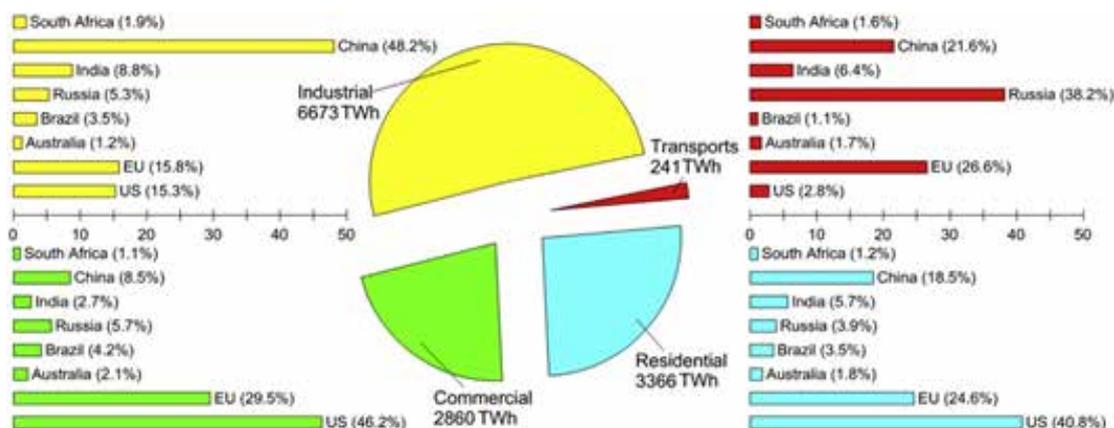


Fig. 2 - Energia elettrica per settore (anno: 2013) [3]

Il settore industriale è responsabile di oltre il 50% del consumo di energia elettrica globale, di cui fino al 20% (cioè 1335 TWh/y) è rappresentato dalla produzione e erogazione alle utenze finali di aria compressa [4]. Considerata una stima del mercato attuale dei compressori d'aria rotativi di circa 16 miliardi di dollari e una previsione di crescita annua pari al 3,6% CAGR nei prossimi 7 anni, si comprende chiaramente il motivo per cui il risparmio o il recupero energetico negli impianti di aria compressa sia considerato un tema molto importante nello sviluppo di un piano di riduzione delle emissioni del gas effetto serra e contenimento degli aumenti della temperatura globale.

Questo argomento ha assunto un'importanza notevole da quando la Direttiva sulla Progettazione Ecocompatibile 2009/125/EC, avendo identificato il gruppo di prodotti "Compressori azionati da motori elettrici" come un gruppo prioritario nella prima iterazione del Piano di Lavoro per la Progettazione Ecocompatibile (periodo 2009 - 2011), ha richiesto alla Commissione Europea di presentare uno studio sui Compressori d'Aria e sulle possibili misure per migliorare il loro impatto sull'ambiente (Lotto 31). Lo studio è in fase di realizzazione e molto probabilmente genererà nuove leggi che elimineranno dai mercati mondiali un'ampia fascia di compressori d'aria che hanno una scarsa energia specifica.

Sebbene negli ultimi decenni la maggior parte dei principali protagonisti nell'industria abbia avuto successo nel ridurre in maniera significativa l'energia specifica dei propri prodotti, l'attuale metodo di calcolo e confronto che viene utilizzato oggi quale standard industriale per la simulazione dei consumi di energia durante il ciclo di vita del compressore d'aria (e quindi il Life Cycle Cost) è intrinsecamente errato e questo è ciò su cui si focalizzerà questo articolo.

TIPICA ANALISI DEL LIFE CYCLE COST DI UN COMPRESSORE D'ARIA

Oggi un potenziale cliente interessato ad acquistare un compressore d'aria industriale, chiede solitamente al produttore le specifiche tecniche del compressore per valutare il Life Cycle Cost di questo investimento in un periodo operativo di 5-10 anni. Negli Stati Uniti il "Compressed Air and Gases Institute" (CAGI) ha creato un portale molto semplice, dal quale si possono scaricare le specifiche tecniche relative a compressori d'aria di diversi costruttori mondiali.

Qualsiasi dato pubblicato sul sito CAGI è stato verificato ed approvato autonomamente da un ente terzo, l'ente di collaudo INTERTEK USA, che ha come compito il collaudo del compressore secondo gli attuali criteri che regolano la valutazione delle prestazioni dei compressori d'aria definiti nella Direttiva Internazionale ISO 1217.

Spesso i dati prestazionali pubblicati nelle documentazioni dei vari produttori di aria compressa generano scetticismo, di conseguenza, le specifiche CAGI sono ormai riconosciute quale metodo più imparziale e preciso per calcolare i Life Cycle Cost nell'industria. In questo modo CAGI offre un valido strumento a salvaguardia degli utenti finali.

Utilizzando gli stessi principi indicati nella Tabella 1 ed estendendo l'esempio mettendo a confronto due compressori d'aria con costi di manutenzione ed investimento capitale (CAPEX) leggermente differenti ma con identica energia specifica verificata da CAGI, si ottengono le seguenti simulazioni di Life Cycle Cost (LCC):

Parametri di installazione	Dati	Unità di misura
Portata aria	15	m ³ /min
Ore di funzionamento	8000	hrs/Yr
Costo energetico	0,2	€/kWh

Compressore 1			Compressore 2		
Energia specifica - CAGI	6,0	kW/m ³ /min	Energia specifica - CAGI	6,0	kW/m ³ /min
Costo d'acquisto	50.000	€	Costo d'acquisto	55.000	€
Costo di manutenzione	4.000	€/Yr	Costo di manutenzione	4.800	€/Yr

Centro costo LCC	Costo
Capex	€ 50.000
Manutenzione a 5 anni	€ 20.000
Costi energia	€ 720.000
Totale LCC	€ 790.000

Centro costo LCC	Costo
Capex	€ 55.000
Manutenzione a 5 anni	€ 24.000
Costi energia	€ 720.000
Totale LCC	€ 799.000

Tabella 3 - Utilizzando la simulazione di un tipico Life Cycle Cost su due compressori con identiche energie specifiche verificate da CAGI ma diversi costi di manutenzione e di investimento capitale (CAPEX)

Nell'esempio di cui sopra, il compressore 2 costa il 10% in più in termini di capitale di investimento e il 20% in più in costi di manutenzione rispetto al compressore 1, ma con identica energia specifica verificata da CAGI. Il risultato consiste in una differenza del Life Cycle Cost (LCC) di soli € 9.000 su un totale di € 790.000 ovvero dell' 1,1%. Il potenziale utente finale ritiene ora di avere tutti i dati necessari per prendere una ponderata decisione in merito a quale compressore acquistare ed installare nel suo impianto. Purtroppo questo metodo si affida ad un presupposto chiave che è fondamentalmente sbagliato e che pertanto può tradursi in utenti finali potenzialmente fuorviati nella loro decisione su come procedere.

Il presupposto è il seguente:

L'Energia Specifica del compressore d'aria è costante nel tempo.

Questo presupposto non può essere applicato né ai compressori a vite, né ai compressori a palette per due motivi molto diversi.

COMPRESSORE A VITE

Per capire come mai il suddetto presupposto non possa essere applicato ai compressori a vite è necessario esaminare il principio di funzionamento degli stessi.

Il disegno dei compressori rotativi a vite consiste in un paio di rotori a lobi elicoidali che si ingranano. Gli alberi del rotore sono supportati da cuscinetti a rulli e reggispinta e normalmente un rotore aziona l'altro tramite i profili elicoidali.

Durante la rotazione i profili delle viti scoprono un orifizio di aspirazione su un lato dello statore attraverso il quale l'aria entra e riempie il volume tra i profili. Sul lato opposto i profili penetrano gli uni negli altri, riducendo in tal modo il volume che comprime l'aria finché vengono scoperte le luci di mandata. Il lubrificante viene iniettato per sigillare, lubrificare e raffreddare l'aria compressa. Il lubrificante viene successivamente eliminato nel serbatoio di accumulo seguito da un filtro finale a coalescenza. Il compressore viene avviato e arrestato tramite il pressostato dell'impianto regolato alle tarature massime e minime [Fig 3], [Fig 4].

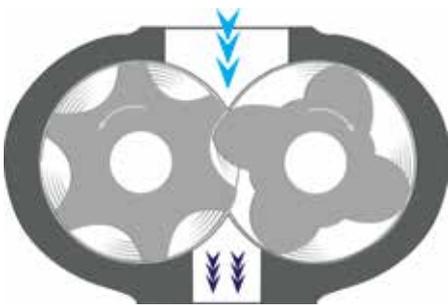


Fig. 3 - I rotori sono montati in uno statore costituito da due cilindri che si intersecano longitudinalmente entro i quali i rotori girano con un minimo gioco.

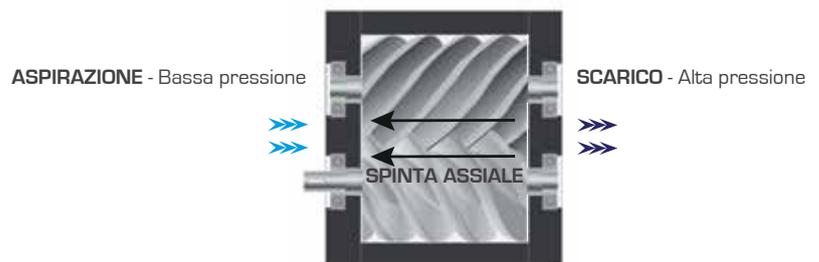


Fig. 4 - Le luci di mandata e aspirazione sono posizionate su lati opposti del compressore in direzione assiale, generando in tal modo un profilo di pressione sbilanciato sulla lunghezza del compressore.

VIE DI FUGA E GIOCHI

Per capire l'importante ruolo chiave dei giochi in un compressore a vite bisogna innanzitutto avere un'idea chiara di tutte le possibili vie di fuga. Nella Fig 5 viene rappresentato lo spaccato di un comune compressore a vite con indicate le vie di fuga del flusso attraverso i giochi.

Molto importanti per le prestazioni della macchina sono sia gli spazi dei giochi tra i rotori (gioco interlobo) e il gioco all'estremità sul lato alta pressione (gioco assiale). Queste vie di fuga collegano le camere di lavoro di alta e bassa pressione, quindi il potenziale di fuga è molto alto. Le restanti vie di fuga indicate nella Fig 5 implicano differenziali di pressione minori e pertanto rivestono meno importanza. La grandezza dei giochi radiali e degli interlobi è determinata dalla dimensione e dai giochi dei componenti principali del compressore. Il gioco assiale viene comunque stabilito durante l'assemblaggio della macchina [5].

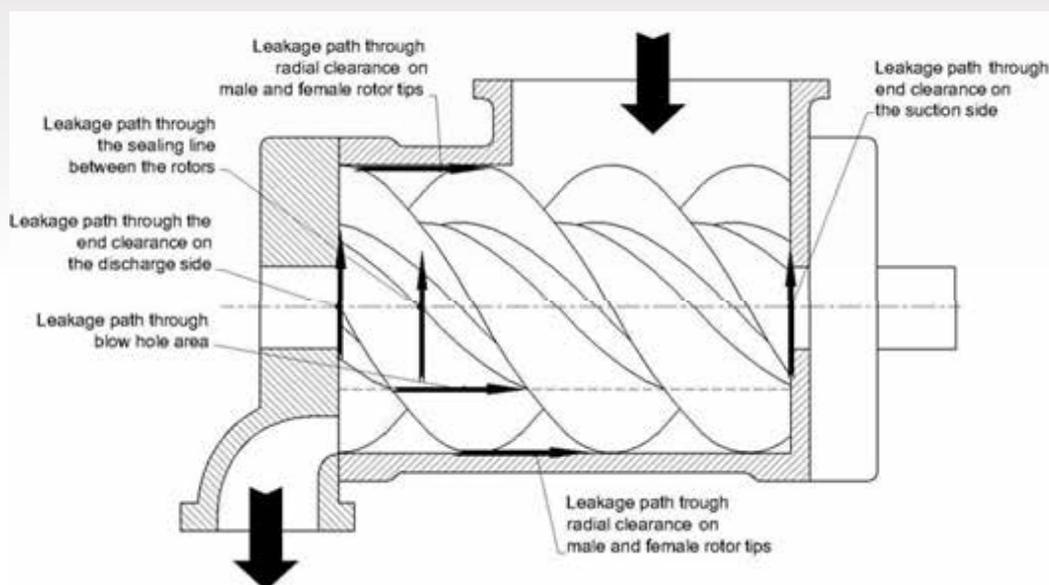


Fig. 5 - Vie di fuga in un compressore a vite

Quindi, poiché le prestazioni dei compressori a vite vengono altamente compromesse dalle fughe, qualsiasi modifica dei giochi all'interno degli stessi avrà un notevole effetto sulla loro efficienza [6].

GIOCHI INTERLOBI ED IL SUO EFFETTO SULLE PRESTAZIONI DEI COMPRESSORI A VITE

Oggi le moderne tecniche di lavorazione dei rotori hanno dimostrato di contenere i valori dei giochi massimi entro il limite di $3\mu\text{m}$. Ciò significa che, per quanto riguarda la sola produzione dei rotori, i giochi tra i rotori possono essere minimi, fino a $12\mu\text{m}$ [7] (quale metro di riferimento la larghezza media del capello di un essere umano è $70\mu\text{m}$).

Sebbene questo consenta la riduzione del gioco degli interlobi e, di conseguenza, migliori l'efficienza volumetrica del compressore, i giochi risultano estremamente piccoli ed effettivamente comparabili ai giochi dei cuscinetti e come conseguenza, possono di fatto interferire con il funzionamento efficiente ed affidabile dei compressori.

L'effetto della grandezza e distribuzione del gioco è stato ampiamente studiato, mettendo in evidenza l'importanza di questi piccolissimi giochi. **E' stato dimostrato che spostando i cuscinetti lato mandata aria di solo $50\mu\text{m}$ si ottiene un importante cambiamento nell'energia specifica del compressore preso in esame del 2.5% (@1500 giri/min. e alla pressione di scarico di 9 bar) [6]. E' stato anche dimostrato che aumentando il gioco interlobi del 31.5%, per esempio da $15\mu\text{m}$ a $20\mu\text{m}$, è stata misurata una perdita del flusso volumetrico del 1.7% [8].**

GIOCO ASSIALE ED IL SUO EFFETTO SULLE PRESTAZIONI DEI COMPRESSORI A VITE

Mentre le dimensioni dei giochi interlobo e radiali sono determinate dalla grandezza e dai giochi dei principali componenti del compressore e dal posizionamento di questi rispetto ai giochi dei cuscinetti a rulli, il gioco assiale viene stabilito durante l'assemblaggio della macchina.

A causa della sua geometria, l'aria pressurizzata in un compressore a vite produce una spinta assiale che fa sì che i rotori riducano il gioco laterale sull'aspirazione ed aumentino il gioco sulla mandata, dove la tenuta è particolarmente critica. I costruttori ne tengono considerazione e compensano/bilanciano i loro giochi assiali alta e bassa pressione di conseguenza. Questi valori possono variare a seconda del costruttore e della taglia del compressore ma possiamo considerare un gioco scarico alta pressione da $25\mu\text{m}$ a $50\mu\text{m}$ e un gioco di aspirazione bassa pressione da $100\mu\text{m}$ a $150\mu\text{m}$.

La spinta laterale è supportata da cuscinetti reggispinta che impediscono ai rotori di toccare la superficie del coperchio finale. La corretta tenuta si ottiene pertanto grazie alla qualità e alla resistenza dei cuscinetti reggispinta.

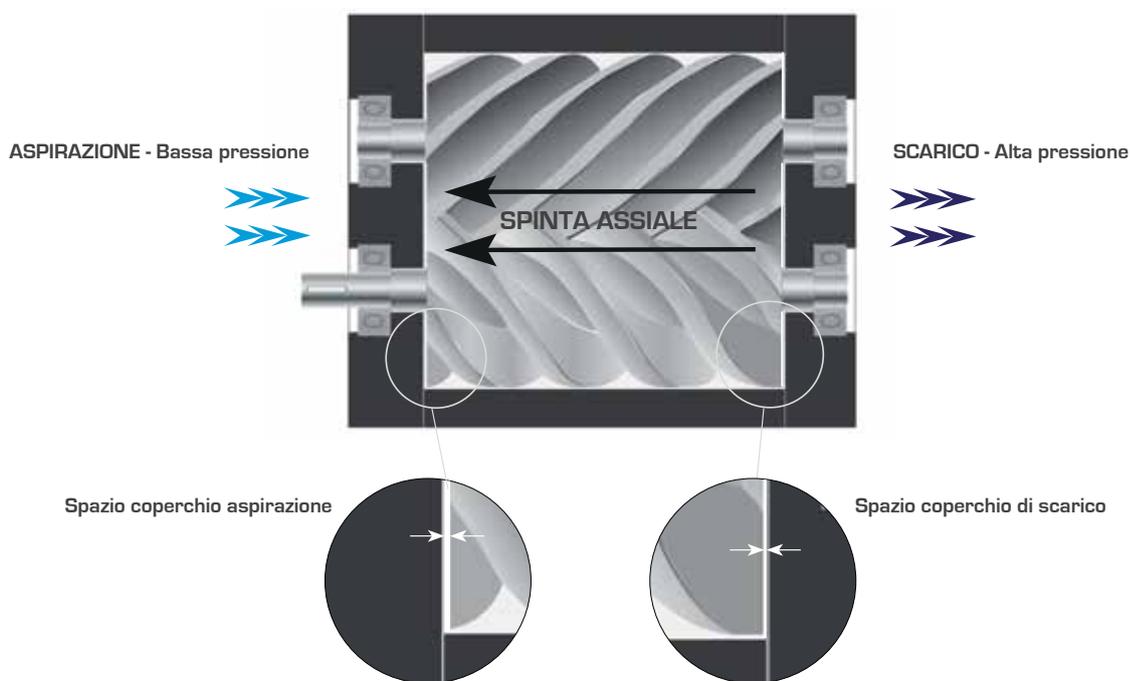


Fig. 6 - L'aria pressurizzata produce una spinta assiale che riduce il gioco sul lato aspirazione ed aumenta il gioco sul lato mandata dove la tenuta è particolarmente critica

In un compressore a vite oil-free una fluttuazione di $35\mu\text{m}$ nel gioco dell'estremità dello scarico ha causato un aumento del 22% dell'energia specifica [5]. Nel caso di un compressore a vite ad iniezione ad olio si auspica che l'effetto che ne deriva sull'energia specifica sia meno significativo, ma è comunque ovvio che c'è una forte correlazione tra i valori di questi giochi e le prestazioni generali del compressore.

COMPRESSORI A VITE A ZERO ORE

Appena usciti dalla linea di assemblaggio della produzione i giochi assiali e interlobo dei compressori a vite saranno precisi e rientreranno nelle indicazioni dei costruttori per consentire le prestazioni specificate: prova ne è che, a Zero Ore, ci sono alcuni produttori principali di compressori a vite i cui dati, verificati da CAGI, sono tra i migliori sul mercato.

Ma cosa succede a questi importanti giochi quando il compressore a vite incomincia a lavorare?

E' un fatto risaputo che sia i cuscinetti a rulli che quelli reggispinta siano soggetti ad usura, ed il loro tasso di usura dipende sia dalla velocità che dal carico [9], e sebbene i produttori possano decidere di utilizzare differenti tipi e dimensioni di cuscinetti, consiglieranno una completa revisione del gruppo pompante ad un numero preciso di ore. Questa revisione consiste nella sostituzione di tutti i principali elementi reggispinta e rulli, riportando il compressore a condizioni di funzionamento sicure ed evitando rotture catastrofiche del gruppo pompante. La maggior parte dei produttori consiglia una completa revisione tra le 40.000 e 50.000 ore di lavoro.

Per inserire tale usura dei cuscinetti nel giusto contesto bisogna considerare questo assunto: nella direzione assiale è accettabile un'usura di 50 μ m come punto di non ritorno per un cuscinetto reggispinta, con rottura grave che si verifica a qualsiasi punto tra 50 μ m e 200 μ m.

Nella direzione radiale, l'usura del cuscinetto in qualsiasi punto al di sopra del gioco del rotore originale del costruttore (12 μ m -25 μ m) provocherà una rottura totale. In entrambi i casi viene dimostrato che il cambiamento in questi giochi causa perdite molto significative nelle prestazioni, pertanto è essenziale capire che le prestazioni del compressore a vite non possono essere considerate costanti nel tempo.

Sebbene curiosamente sia difficile trovare libri/riviste che studiano questo fenomeno, nella realtà i casi in cui le società di controllo energetico misurano flussi e potenze rilevati su vecchi compressori a vite prima della revisione, sono molte e ben documentate. In un caso [10] su 27 compressori a vite frigoriferi testati in momenti diversi della loro vita operativa, fino a 10 anni, il livello medio di peggioramento delle prestazioni è stato del 30%, con un picco del 55% per i compressori con il peggiore livello di deterioramento.

Ovviamente si può solo supporre che questi siano casi estremi e le scelte dei cuscinetti per gli attuali compressori siano migliorate drasticamente. **Nonostante questo, è impossibile affermare che non sia un reale peggioramento delle prestazioni in un compressore a vite proprio per la natura stessa dei cuscinetti ed i principi di ingegneria intrinseci dei compressori a vite.**

IL PRINCIPIO DEL COMPRESSORE ROTATIVO A PALETTE

Anche quando si considerano i compressori rotativi a palette, l'energia specifica a Zero Ore non rimane costante nel tempo. Ancora una volta per spiegare questo bisogna esaminare i principi di ingegneria.

Il gruppo pompante consiste in un unico rotore disassato che ruota all'interno di uno statore cilindrico. L'elemento di compressione è chiuso con due coperchi finali che contengono due bronzine di metallo bianco. Il rotore ha cave longitudinali lavorate nelle quali si inseriscono liberamente palette scorrevoli. Il rotore viene generalmente azionato tramite accoppiamento diretto motore-compressore, ruotando ad una velocità tra i 1000 e i 1500 giri/min. (50 Hz). Questo fa sì che le palette siano a stretto contatto con la parete dello statore, formando in tal modo le tasche di compressione. L'aria che viene aspirata sulla lunghezza dello statore al punto di massimo volume, viene bloccata nella tasca ed il volume ridotto (pressione aumentata) attraverso una rotazione. Al punto di minor volume l'aria viene scaricata dall'elemento di compressione (taratura pressione massima). La pressione dell'aria generata internamente viene utilizzata come pompa lubrificante.

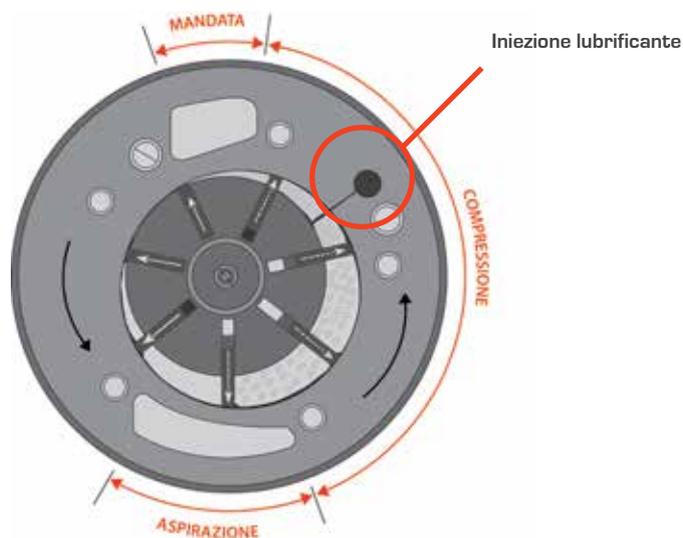


Fig. 7 - Il lubrificante iniettato nello statore lubrifica le parti in movimento ed assorbe il calore della compressione. Tutti i giochi di funzionamento (estremità del rotore ed estremità/bordi delle palette) sono completamente sigillati con il lubrificante che previene perdite da alta a bassa pressione

VIE DI FUGA E GIOCHI

Nei compressori a palette, le palette sono sempre in contatto con il velo di lubrificante sulla superficie interna dello statore. Questo mantiene le due superfici di metallo separate e fa da tenuta tra le celle adiacenti. Un velo di lubrificante si deposita sull'estremità frontale della paletta scorrevole. Il raggio dell'estremità della paletta lavorato in modo preciso, l'adesione del lubrificante all'elemento scorrevole e la superficie di supporto (lo statore) fanno aumentare la pressione del lubrificante e creano un film di lubrificazione idrodinamica tra le due superfici. L'aumento di viscosità che si ha nel lubrificante, quando viene applicata pressione estremamente alta, consente al lubrificante di evitare di essere espulso fra le superfici mantenendo un velo costante nel tempo. Il lubrificante funge anche da perfetto sigillante [Fig 8].

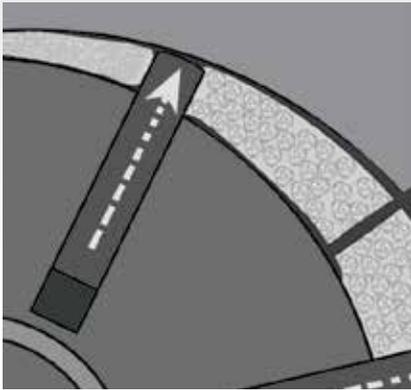


Fig. 8 - Le palette si muovono liberamente nelle scanalature del rotore e fanno sempre tenuta contro la parete dello statore. Le prestazioni non si deteriorano anche dopo decine di migliaia di ore di funzionamento.

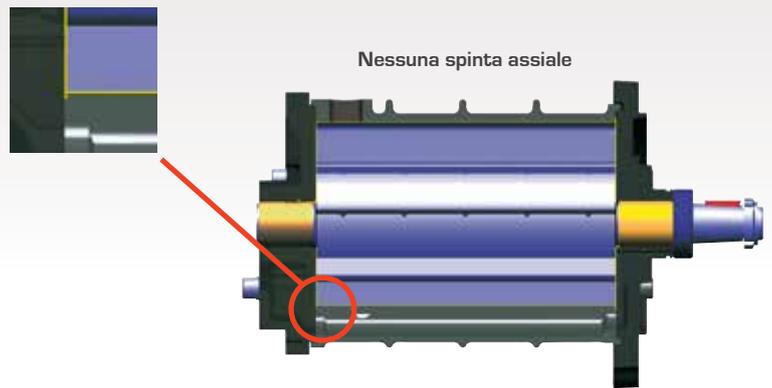


Fig. 9 - Non esiste alcuna spinta assiale in un compressore rotativo a palette. Il rotore è libero di muoversi assialmente ed è mantenuto equamente distante dai coperchi finali per mezzo del lubrificante che viene iniettato in pressione. Il lubrificante iniettato impedisce all'aria di uscire dai piani laterali.

Un'altra potenziale via di fuga è attraverso i coperchi finali del compressore. Il compressore a palette non ha spinta assiale che spinge il rotore contro uno dei due coperchi finali. Non è pertanto necessario controllare la sua posizione assiale tramite cuscinetti reggispinga. Il gioco assiale viene stabilito durante l'assemblaggio della macchina. Dato che il rotore è libero di muoversi assialmente, viene mantenuto equamente distanziato da entrambi i coperchi finali tramite il lubrificante che viene iniettato in pressione, attraverso fori/luci di iniezione nei coperchi finali, impedendo il contatto e garantendo una tenuta efficiente [Fig 9].

Dato che in un compressore rotativo a palette non ci sono cuscinetti a rulli e reggispinga, i giochi stabiliti dal costruttore restano costanti nel tempo di vita del compressore. Il vantaggio è doppio, in primo luogo non ci sarà mai alcuna perdita di efficienza volumetrica nel tempo, in secondo luogo il compressore non necessiterà mai di revisione per la sostituzione dei cuscinetti usurati, e questo permette a Mattei di estendere la garanzia sul gruppo pompante (air-end) a 10 anni con ore illimitate.

Avendo dimostrato che l'efficienza volumetrica non cambia nel tempo, perché dare per scontato che questo assunto non è corretto nemmeno per i compressori rotativi a palette?

LUCIDATURA DELLE PALETTE E LE PRIME 1000 ORE

Dal momento in cui si avvia un compressore rotativo a palette e lo si fa funzionare fino a circa 1000 ore, le palette vengono sottoposte ad un processo di lucidatura sui ambo i lati. Sebbene Mattei rifinisca i lati delle palette per avere una tolleranza molto precisa, le prime 1000 ore di funzionamento consentono una lucidatura completa e unica tra la scanalatura e i lati delle palette. In termini tribologici, la lucidatura elimina le ruvidità su entrambe le superfici di contatto, e poiché queste sono fatte di materiali complementari, la lucidatura darà inizio ad un trasferimento microscopico di materiale che durerà per l'intera vita del compressore.

Questo non deve essere confuso con l'usura, nella quale una delle due superfici che sfregano perde materiale ad un tasso costante mentre l'altra non viene intaccata, dato che questo provocherebbe una rottura totale dopo pochissime ore di funzionamento. **Invece, i materiali speciali utilizzati nella costruzione dei compressori rotativi a palette Mattei assicurano che le palette originali non necessitino mai di essere sostituite e durino ben oltre il traguardo della garanzia di 10 anni.**

L'effetto della lucidatura ha un impatto significativamente positivo sulla potenza persa per lo sfregamento e di conseguenza sulla potenza richiesta dal compressore. Questo effetto è da sempre noto agli operatori industriali nel campo del rotativo a palette ma non era mai stato testato scientificamente e autonomamente fino ad ora!

Nel 2016 Mattei ha condotto due test paralleli a lungo termine. Il primo su un modello Maxima 75 Xtreme a 50 Hz effettuato nella nuova e moderna sala collaudo Ricerca e Sviluppo recentemente completata, ed un secondo su un modello Maxima 55 a 60 Hz presso la sede di INTERTEK negli Stati Uniti. INTERTEK è l'ente che esegue tutti i collaudi di verifica dei compressori per CAGI negli Stati Uniti.

In entrambi i casi, le prestazioni dei compressori sono state rilevate a Zero Ore e i dati sono stati poi misurati ogni 100 ore di funzionamento. I risultati sono stati eccezionali a dir poco. In entrambi i casi si è ottenuta una significativa e misurabile riduzione nella potenza assorbita ad una portata costante, con notevoli miglioramenti del livello di energia specifica.

Modello	Frequenza	Collaudatore	Cambiamento Energia Specifica
Maxima 75 Xtreme	50 Hz	Mattei R&D	-5%
Maxima 55	60 Hz	Intertek	-4%

Tabella 4 – Due lunghi test separati eseguiti in condizioni controllate che dimostrano il miglioramento di Energia Specifica nel tempo per i compressori rotativi a palette Mattei

Quindi è chiaro che quando si considera un compressore rotativo a palette, l'energia specifica a Zero Ore misurata da CAGI non deve essere confusa con l'Energia Specifica della vita del compressore.

NUOVA ANALISI DEL LIFE CYCLE COST

Con i dati discussi sopra si può procedere a descrivere una visione più realistica quando si simula il Life Cycle Cost di un compressore.

Tornando all'esempio esaminato prima, sebbene il compressore a palette e il compressore a vite abbiano la stessa Energia Specifica a Zero Ore CAGI, nei calcoli del Life Cycle Cost (LCC) possiamo ora procedere includendo il peggioramento delle prestazioni per il vite e il miglioramento delle prestazioni per il palette.

E' importante sottolineare che diversi produttori di Compressori a Vite scelgono di utilizzare una varietà di diversi cuscinetti nelle loro macchine. Per questa ragione non si può arbitrariamente scegliere un tasso di deterioramento per tutti i compressori a vite. **Peraltro è stato dimostrato, tramite ricerca scientifica, che è sufficiente l'usura del cuscinetto equivalente ad un quattordicesimo della larghezza del capello di un essere umano ($5\mu\text{m}$) per perdere circa il 2% nella prestazione volumetrica di un compressore a vite.** Quindi effettueremo i nuovi calcoli del Life Cycle Cost (LCC) considerando un peggioramento delle prestazioni del compressore a vite di -2%, -5% e -10% per la durata di 5 anni del compressore (prima della revisione prevista), tentando di includere la maggior parte delle scelte di cuscinetti dei costruttori di Compressori a Vite.

Considerando identici costi di investimento iniziale Capex e di manutenzione, e selezionando due compressori da 75 kW con la stessa Energia Specifica a Zero Ore dichiarata nelle specifiche CAGI, si può rappresentare l'energia specifica nel tempo nel modo seguente.

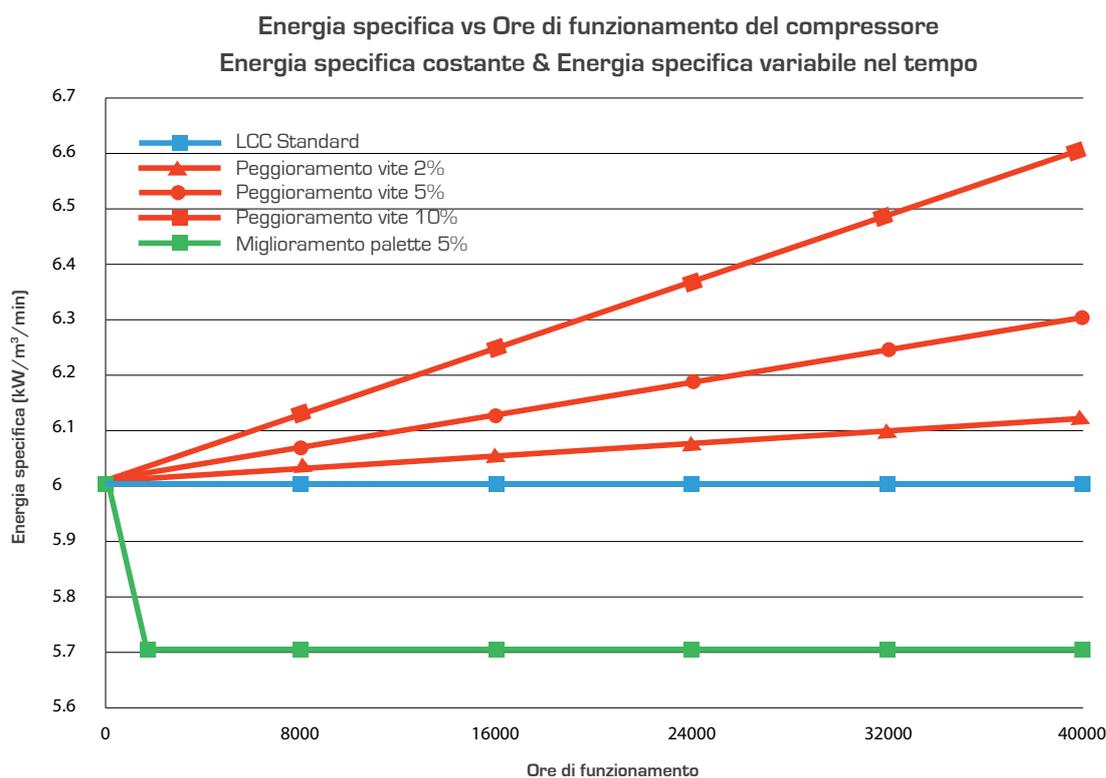


Fig. 10 - Cambiamenti di energia specifica durante le ore di funzionamento per diversi deterioramenti delle prestazioni del vite in 5 anni

Applicando le nuove considerazioni del calcolo Life Cycle Cost (LCC) all'installazione campione di compressore della tabella 1 si ottengono i seguenti risultati:

	Nuovo LCC palette	LCC standard palette	LCC standard vite	Nuovo LCC -2% vite	Nuovo LCC -5% vite	Nuovo LCC -10% vite
	Miglioramento +5% @1000 ore	En. specifica costante nel tempo	En. specifica costante nel tempo	Peggioramento -2% @40.000h	Peggioramento -5% @40.000h	Peggioramento -10% @40.000h
Capex	€ 50.000	€ 50.000	€ 50.000	€ 50.000	€ 50.000	€ 50.000
Manutenzione a 5 anni	€ 20.000	€ 20.000	€ 20.000	€ 20.000	€ 20.000	€ 20.000
Costi energia	€ 684.450	€ 720.000	€ 720.000	€ 727.258	€ 738.000	€ 756.000
LCC totale	€ 754.450	€ 790.000	€ 790.000	€ 797.258	€ 808.000	€ 826.000
Differenza con il nuovo costo ciclo vita palette	€ -	€ 35.550,00	€ 35.550,00	€ 42.807,83	€ 53.550,07	€ 71.550,06

Tabella 5 - Confronto Life Cycle Cost di 5 anni tra i calcoli standard, con energia specifica costante e i nuovi calcoli con energia specifica variabile.

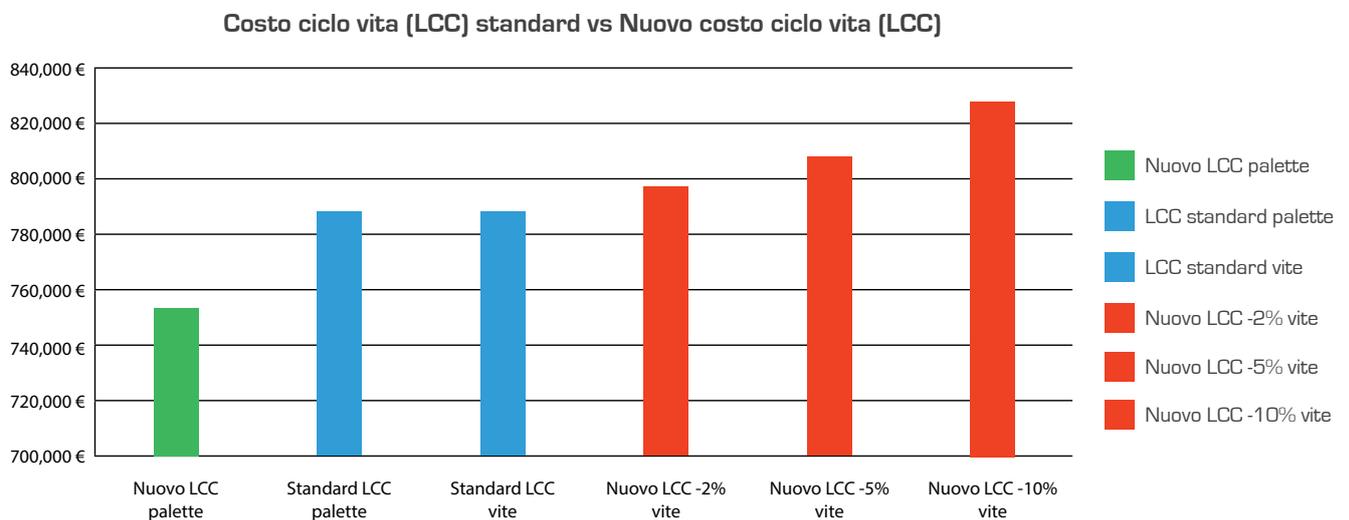


Fig. 11 - Rappresentazione grafica dei dati nella tabella 5

Estendendo il calcolo del Life Cycle Cost (LCC) ad un periodo di 10 anni, si devono considerare i costi della revisione completa del compressore a vite per riportare il gruppo pompante alle sue condizioni originali ed evitare la rottura del cuscinetto. In questo esempio viene utilizzato il costo normale dell'industria di revisione del costruttore originale del 50% del costo di investimento iniziale. **Per il rotativo a palette non c'è costo di revisione durante la vita del compressore e questo è chiaro vista la garanzia di 10 anni sul gruppo pompante che la Mattei applica ai suoi compressori.** In questo esempio il costo della revisione per il compressore a palette equivale a zero.

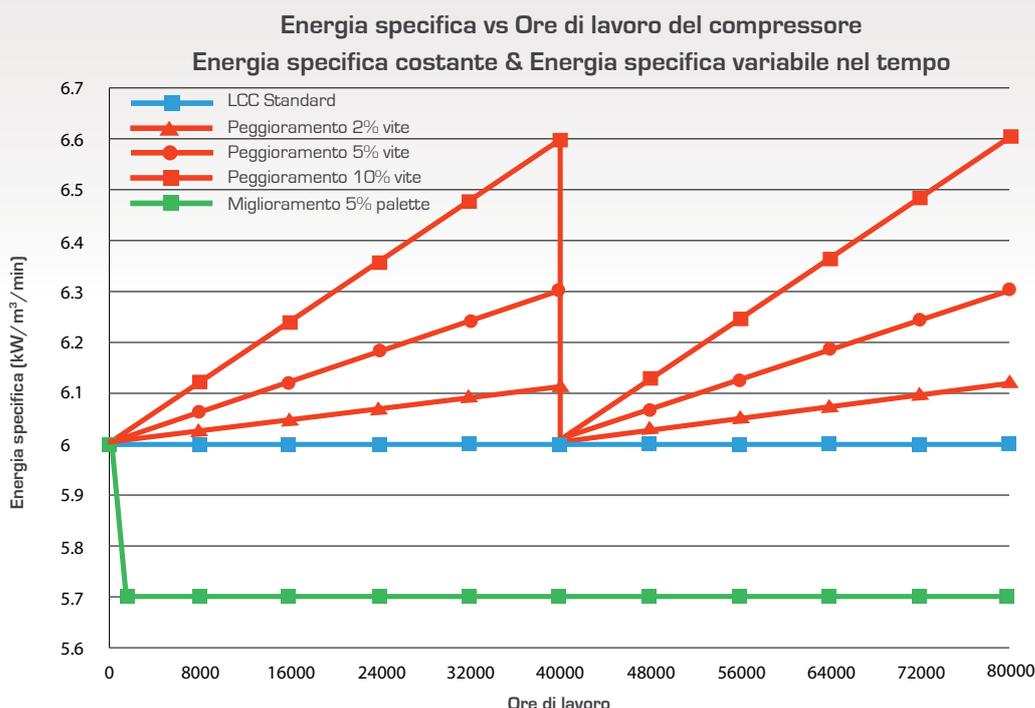


Fig. 12 - Cambiamenti di energia specifica durante le ore di funzionamento per diversi deterioramenti delle prestazioni delle viti in 10 anni con revisione del compressore a 40000 ore

	Nuovo LCC palette Miglioramento +5%@1000ore	LCC Standard palette En. specifica costante nel tempo	LCC Standard vite En. specifica costante nel tempo	Nuovo LCC -2% vite Peggioramento -2%@40.000h	Nuovo LCC -5% vite Peggioramento -5%@40.000h	Nuovo LCC -10% vite Peggioramento -10%@40.000h
Capex	€ 50.000	€ 50.000	€ 50.000	€ 50.000	€ 50.000	€ 50.000
Manutenzione @10 anni	€ 40.000	€ 40.000	€ 40.000	€ 40.000	€ 40.000	€ 40.000
Revisione a 40k ore	€ -	€ -	€ 25.000	€ 25.000	€ 25.000	€ 25.000
Costi energia	€ 1.368.450	€ 1.440.000	€ 1.440.000	€ 1.454.516	€ 1.476.000	€ 1.512.000
Totale LCC	€ 1.458.450	€ 1.530.000	€ 1.555.000	€ 1.569.516	€ 1.591.000	€ 1.627.000
Differenza con il nuovo LCC del palette	€ -	€ 71.550,00	€ 96.550,00	€ 111.065,66	€ 132.550,14	€ 168.550,12

Tabella 6 - Confronto Life Cycle Cost di 10 anni tra calcoli standard, con energia specifica costante ed i nuovi calcoli con energia specifica variabile.

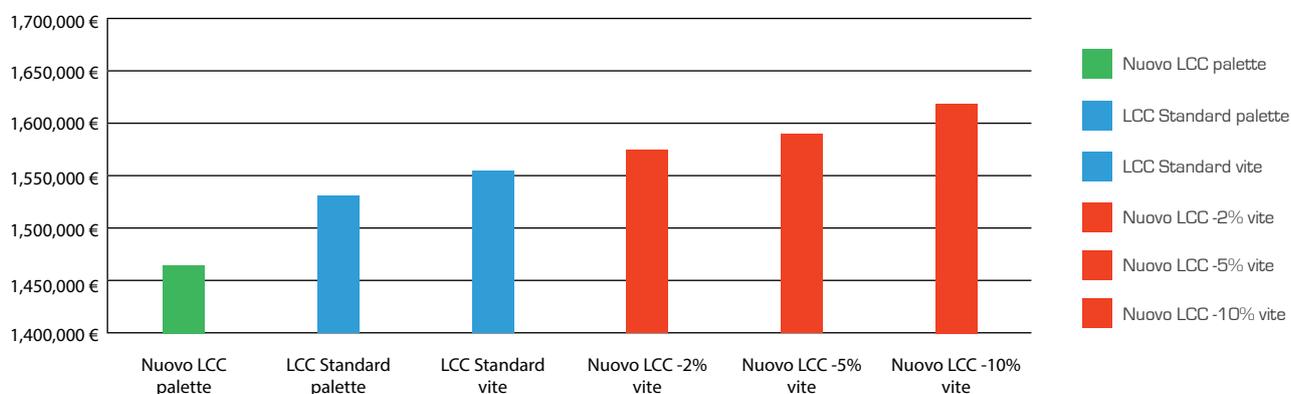


Fig. 13 - Rappresentazione grafica dei dati nella tabella 5

CONCLUSIONI

Il nuovo metodo per calcolare il Life Cycle Cost proposto prende in considerazione sia il miglioramento nelle prestazioni del compressore rotativo a palette, che la perdita di prestazione del compressore a vite nel tempo. E' evidente che c'è una grossa differenza nelle simulazioni del costo energetico quando viene applicato il nuovo metodo di calcolo del Life Cycle Cost (LCC) rispetto al metodo standard riconosciuto dall'industria. **Nel caso di peggioramento delle prestazioni del vite del 10% in un periodo di 10 anni, prevedendo la revisione, il cliente potrebbe spendere €168,000 o il 12% in più (più di tre volte il costo dell'investimento iniziale Capex) selezionando un vite rispetto ad un palette anche se i compressori hanno le stesse prestazioni a Zero Ore verificate da CAGI.** Questo tema deve essere affrontato, specialmente in vista del fatto che i dati di prestazione del compressore a Zero Ore vengono ora utilizzati per redigere leggi che aiutino a contenere l'attuale crisi del riscaldamento mondiale. Se questa importante informazione non viene presa in considerazione, l'effetto benefico, auspicato dalle nuove normative sulla riduzione di energia consumata dalla compressione d'aria industriale, rischia seriamente di non essere ottenuto.

REFERENZE

- [1] Climate change 2014: mitigation of climate change - D. Victor, D. Zhou, Intergovernmental panel on climate change 5th assessment report; 2013. p. 34e5
- [2] https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_en
- [3] International Energy Agency. Redrawing the energy-climate map. World En Outlook Rep 2013:32e3.
- [4] Energy saving potential in existing industrial compressors - D. Vittorini, R. Cipollone, Energy 102 2016, 502-515
- [5] Influence of thermal dilatation upon design of screw machines - A. Kovacevic, N. Stosic, E. Mujic, I. k. Smith, International Design Conference, Design 2006
- [6] Improving screw performance - N. Stosic, I. k. Smith, A. Kovacevic, J. Kim, J. Park, Centre for Positive Displacement Compressor Technology, City University London
- [7] Calculation of rotor interference in screw compressors - N. Stosic, I. k. Smith, A. Kovacevic, Centre for Positive Displacement Compressor Technology, City University London
- [8] Rotor clearance design and evaluation for an oil injected twin screw compressor - D. Buckney, A. Kovacevic, N. Stosic, 9th International Conference on Compressors and Systems 2015
- [9] Compressor handbook - P. C. Hanlon - General Bearing Principles 19.3, McGraw-Hill, 2001
- [10] Screw Compressor Wear - Australian Government Department of Industry, Australian Meat Industry Council