

FILIPPO BUSATO, MARCO NORO

*Storia delle pompe di calore:  
principi, tecnologie, applicazioni*

*History of heat pumps:  
principles, technologies, applications*

*Sommario*

Negli ultimi venti anni il mercato delle pompe di calore ha avuto un continuo, anche se altalenante, trend di crescita, legato agli incentivi economici ed alla legislazione. Fino ad allora, si trattava di una tecnologia ai più sconosciuta. Il motivo risiedeva sostanzialmente nel maggior costo di investimento e nella maggior complessità realizzativa rispetto al tradizionale generatore di calore a combustione, e non certo nell'efficienza di conversione dell'energia impiegata. Tale valore supera quello del primo principio della termodinamica (limite invalicabile per una caldaia). Dai primi sviluppi, a partire dalla macchina frigorifera, della pompa di calore a compressione meccanica e di quella termoelettrica della prima metà dell'800, fino al più recente sviluppo delle pompe di calore ad assorbimento, la storia è sorprendente. Inizialmente la ricerca è stata indirizzata ai fluidi impiegati per il miglioramento dell'efficienza, e più recentemente alla riduzione dell'impatto ambientale. E proprio le caratteristiche vantaggiose in termini di efficienza energetica e basso impatto ambientale stanno spingendo negli ultimi anni il legislatore, e quindi l'utente finale, ad una scelta consapevole verso questa tecnologia. Vengono ripercorsi la tecnologia e le applicazioni che nella storia si sono succedute fino al recente ed in divenire successo della pompa di calore.

*Abstract*

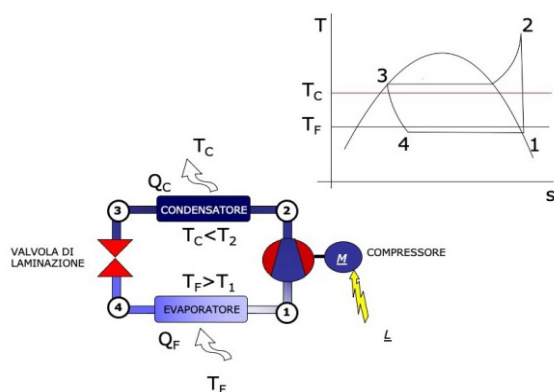
In the last twenty years, the heat pump market has had a continuous, albeit fluctuating, growth trend, linked to economic incentives and favorable legislation. Until then, heat pump was a technology unknown to most people. The reason was substantially due to the higher investment cost, and to the greater manufacturing complexity compared to the traditional combustion heat generator. It was certainly not due to the energy conversion efficiency, as this value exceeds that of the first Law of thermodynamics (that can't be exceeded by a boiler), and it tends to that of the second. From the early stages, based on refrigeration units, of the mechanical compression heat pump and

the thermoelectric heat pump in the first half of the 19th century, till the most recent development of absorption heat pumps, the history is fascinating. At the beginning, research aimed to new and more efficient fluids, while later the target become the reduction of the environmental impact. As a matter of fact, the advantageous features in terms of energy efficiency and low environmental impact in the recent years have been pushing the legislator, and therefore the end user, to make a conscious choice towards this technology. The paper runs through the history of technology and applications until the recent and in becoming successful of the heat pump.

### *Introduzione: qualche considerazione di termodinamica*

Come è noto, la pompa di calore è una macchina termodinamica a ciclo inverso che, durante il funzionamento, produce entrambi gli effetti utili, quello frigorifero  $Q_F$  a temperatura  $T_F$  all'evaporatore e quello termico  $Q_C$  a temperatura  $T_C$  al condensatore, come mostrato in Figura 1. In effetti, la nascita e lo sviluppo delle pompe di calore sono fortemente connessi con l'esigenza pratica di produrre ghiaccio, come si vedrà nel paragrafo successivo.

Ci si potrebbe chiedere da dove sia nata l'esigenza di costruire delle macchine di tipo termodinamico per produrre energia termica a temperatura superiore a quella ambientale, quando allo stesso fine esisteva già da tempi remoti una tecnologia semplice, affidabile e relativamente poco costosa: la combustione. La risposta sta nella ricerca di una maggiore efficienza nell'utilizzo delle fonti energetiche, che ha da sempre indirizzato la ricerca scientifica e tecnologica in quest'ambito, con vantaggi nell'economia di esercizio ma anche dal punto di vista delle emissioni inquinanti. Se l'energia termica viene prodotta dalla pompa di calore utilizzando energia elettrica da fonte di origine non fossile, ad esempio idroelettrica, fotovoltaica o eolica, i vantaggi sono evidenti. In realtà, il limite della tecnologia legata alla combustione diretta è proprio il rendimento energetico unitario, rispetto al potere calorifico superiore del combustibile utilizzato. Tale limite è dato dal principio teorico di funzionamento del generatore: la combustione diretta del combustibile e la sua trasformazione in energia termica, con la conseguente fortis-



**Fig. 1 – Schema della macchina frigorifera / pompa di calore e ciclo termodinamico inverso (Grassi, 2018).**

sima degradazione della “qualità” dell’energia (contenuto exergetico, inteso come la massima quantità di lavoro meccanico che si può ottenere quando questa viene scambiata con l’ambiente naturale a fissata temperatura e pressione). Di fatto, si può dimostrare che, con le tecnologie attuali, la pompa di calore è oltre tre volte (in senso exergetico), ovvero quasi due volte (in termini di consumo di energia primaria non rinnovabile a parità di energia termica utile prodotta) più efficiente della caldaia.

### *Refrigerazione prima delle macchine a compressione di vapore*

La nascita e lo sviluppo delle pompe di calore, in quanto macchine termodinamiche basate su un ciclo inverso, sono fortemente connessi con la storia della refrigerazione artificiale. Lo sviluppo di entrambi è stato stimolato a partire dalla prima metà del 1800 dalla crescita di un mercato per il ghiaccio come oggetto di lusso utilizzato dalle classi agiate, ma anche dalle esigenze del settore dei trasporti marittimi per conservare la carne e i prodotti alimentari durante i lunghi viaggi oceanici.

Durante la prima metà del 1800, con lo sviluppo del commercio mondiale, alcune terre del nord si resero conto di avere un’enorme risorsa nel loro ghiaccio invernale, che poteva essere trasportato nelle stive delle navi isolate con segatura o paglia, con perdite fino a 1/3. Nel 1879, l’industria del ghiaccio americano era stimata in 8 milioni di tonnellate raccolte all’anno, con 5 milioni di tonnellate che riuscivano a raggiungere il consumatore (Weightman, 2003).

Al culmine del commercio (intorno al 1900), l’importazione annuale del Regno Unito dalla Norvegia era di circa 500.000 tonnellate (Weightman, 2003).

### *Refrigerazione artificiale: i primi studi teorici e sperimentali*

Anche prima che fosse inventata la macchina frigorifera venivano impiegate altre tecniche per produrre un effetto frigorifero artificiale. Ad esempio, era noto da tempo che un liquido volatile, come etere o alcool, produceva un effetto di raffreddamento quando evaporava. Già nei secoli passati in Medio Oriente e India era nota la tecnica del raffreddamento evaporativo, ad esempio per produrre granite di ghiaccio da stagni poco profondi, oppure tramite l’utilizzo di vasi o contenitori in terracotta, che è un materiale poroso, durante le notti a bassa umidità (Weightman, 2003).

Dal 1748, quando lo scozzese William Cullen dimostrò l’effetto frigorifero all’Università di Glasgow, fino al 1902, quando Richard Mollier creò le prime rappresentazioni grafiche delle proprietà termodinamiche dei fluidi frigoriferi, vi è stato un approfondito e ampio sviluppo della scienza termodinamica, passando per Carnot, Mayer, Joule, Clausius, Kelvin, Boltzmann e Gibbs. Tra i padri fondatori della refrigerazione e quindi della macchina a ciclo inverso a compressione meccanica, non si può non citare Carl von Linde, il quale in un lavoro del 1871 stabilì, sulla base di un confronto termodinamico, che i sistemi a compressione meccanica risultavano più efficienti dei sistemi basati sull’assorbimento.

*Lo sviluppo della pompa di calore: la fase pioneristica (prima del 1875)*

Già nel 1852 Lord Kelvin ebbe un'intuizione riguardo alla pompa di calore, affermando che il "motore termico inverso" poteva essere utilizzato non solo per il raffreddamento ma anche per il riscaldamento, ed evidenziando che un tale dispositivo di riscaldamento avrebbe necessitato di meno energia primaria a causa dell'estrazione di energia termica dall'ambiente (Thomson, 1852; Ostertag, 1946).

Tuttavia, prima di arrivare ad avere sul mercato le prime macchine dedicate al riscaldamento degli ambienti ci vollero ancora molti decenni. Nel periodo precedente al 1875, l'interesse verso le macchine a ciclo inverso era dato, oltre che dalla necessità di produrre ghiaccio in modo artificiale, anche dall'utilizzo nei processi industriali di distillazione, concentrazione o di essiccazione (nella versione "macchina a compressione a ciclo aperto") (Zogg, 2008).

Un primo passo "preparatorio" allo sviluppo successivo della pompa di calore per il riscaldamento degli ambienti fu l'introduzione dell'acqua in fase liquida al posto del vapore negli impianti di riscaldamento centralizzati degli edifici.

Jacob Perkins, un inventore americano che viveva in Inghilterra, costruì nel 1834 la prima macchina a compressione meccanica di vapore per la produzione di ghiaccio. Utilizzava, con una carica di etere dimetilico come refrigerante, i quattro componenti principali usati ancora oggi nelle moderne macchine: un compressore, un condensatore, una valvola di espansione e un evaporatore. Successivamente, altri inventori, ingegneri e scienziati si dedicarono alla costruzione di macchine a compressione meccanica per la produzione di freddo. La prima macchina costruita dal tedesco Linde nel 1875 utilizzava l'etere metilico come refrigerante, installata due anni dopo in un birrificio in Italia (Linde, 2004). Nel 1866 fu introdotta l'anidride carbonica come refrigerante dall'americano Thaddeus S.C. Lowe, che inventò un compressore a CO<sub>2</sub>. Il sistema ottenne un buon successo soprattutto sulle navi dopo il 1890, dove sostituì le macchine ad aria. In America, un impianto di produzione di ghiaccio a compressione di vapore di ammoniaca fu costruito da John Beath nel 1868.

Riguardo alle macchine ad assorbimento, nel 1851 il francese Ferdinand Carré progettò il primo assorbitore ad ammoniaca di un certo successo commerciale, capace di produrre da 0,5 a 2 kg di ghiaccio a ogni operazione. Tuttavia, il costo, le dimensioni e la complessità del sistema, insieme alla tossicità dell'ammoniaca, impedirono la diffusione dell'assorbitore per un uso domestico. Le versioni successive, più evolute perché comprendevano anche il generatore di calore a combustione e il rettificatore a valle, furono brevettate nel 1859 e 1860 in Francia.

*Lo sviluppo della pompa di calore: la fase di industrializzazione (1875-1920)*

In questo periodo le macchine frigorifere di tipo prototipale realizzate nella fase pioneristica furono sostituite da sistemi più affidabili sulla base di un rapido progresso delle conoscenze scientifiche e della capacità produttiva industriale.

La pompa di calore per il riscaldamento degli ambienti rimase tuttavia una sorta di “visione” di alcuni ingegneri, visionari appunto, del tempo. Ad esempio, l’ingegnere esperto di turbine Heinrich Zoelly della *Escher Wyss* fu il primo a proporre una pompa di calore ad azionamento elettrico che utilizzasse il terreno come sorgente termica per la produzione di calore a bassa temperatura (Wirth, 1955).

Una delle ragioni principali del predominio dei sistemi ad assorbimento fino al 1890 circa fu l’uso diretto del vapore come energia termica in ingresso, dato che a quel tempo l’energia elettrica veniva prodotta da impianti a vapore con rendimenti molto bassi.

Per quanto riguarda i componenti, in questo periodo il compressore a pistoni trascinato da un motore a vapore, in Figura 2, era la soluzione largamente più ricorrente; il motore elettrico era ancora agli albori del proprio sviluppo se si pensa che negli USA nel 1914 si produceva il 90% della forza motrice tramite macchina a vapore. La velocità di rotazione media per un compressore da 350 kW, intorno al 1890, era di 40 giri/min, ma sarebbe aumentata fino a 220 giri/min nel 1916.

Altre tipologie di compressore videro la luce, almeno dal punto di vista concettuale, in questo periodo: il principio di funzionamento del compressore a vite fu brevettato da Heinrich Krigar in Germania nel 1878. Una delle prime macchine a palette fu l’aspiratore Lemielle, inventato in Francia all’inizio del 1880, mentre i primi turbocompressori furono prodotti all’inizio del 1900, originariamente sviluppati dai produttori di turbine a vapore, ma presentavano forti limiti. Sarebbero passati decenni prima che la tecnologia permettesse di realizzare turbocompressori ad alta efficienza. Fu l’americano Willis Carrier (1876-1950) che per primo lavorò sui turbocompressori radiali, dal 1911 applicati alle macchine frigorifere per gli impianti di climatizzazione. Il principio del compressore scroll fu brevettato nel 1905 dal francese Leon Creux ma non ebbe successo commerciale fino all’inizio degli anni 1980, quando sono diventate disponibili le stazioni di lavorazione meccaniche di alta precisione necessarie a produrre le spirali orbitanti in grandi numeri e con costi concorrenziali. Infine, l’idea del compressore ermetico, ovvero di racchiudere compressore e motore nello stesso involucro sigillato, nacque dall’osservazione di un consumo di una quota notevole

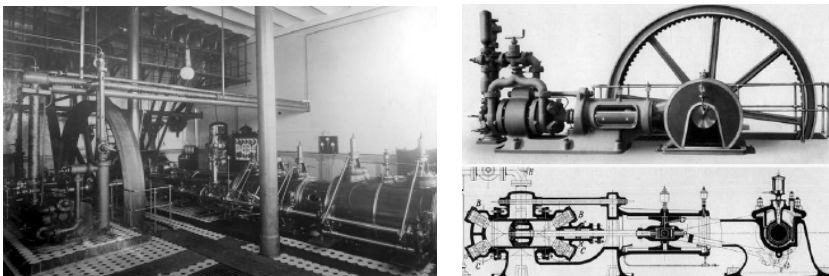


Fig. 2 – Compressore a pistoni trascinato da un motore a vapore attorno al 1905 (per cortesia della Sulzer).

di energia meccanica da parte del premistoppa (che necessita di assistenza periodica per prevenire il rischio di fughe del fluido refrigerante e di perdite di lubrificante.) soprattutto nelle piccole macchine. Fu il francese Marcel Audiffren a inventare questa soluzione tecnica nel 1905, ma il motore elettrico dell'epoca, a spazzole e collettore e con un isolamento elettrico ancora non troppo efficace, non si prestava alla concreta realizzazione dell'idea, che divenne una proposta commerciale solo dopo la prima guerra mondiale (Thevenot, 1979; Cashflo, 2007; Nagengast et al., 2006).

Alla fine di questo periodo l'ammoniaca era il refrigerante dominante, soprattutto grazie all'invenzione da parte di Linde di un compressore con cilindro orizzontale a doppio stadio, in Figura 2, che ebbe un enorme successo e fu brevettato e realizzato su licenza da numerose aziende nel mondo (Thevenot, 1979; Kläy, 1994; Nagengast et al., 2006; Friotherm, 2008).

Tuttavia, altre sostanze naturali furono utilizzate: l'anidride carbonica, molto utilizzata sulle navi britanniche per il trasporto delle merci deperibili ma anche in applicazioni industriali, e l'anidride solforosa, che ebbe un discreto successo grazie al compressore di Raoul Pictet (1876) soprattutto nelle piccole taglie, mentre nelle applicazioni di grossa taglia di tipo industriale venne poi gradualmente sostituita dall'ammoniaca; il cloruro di metile, o clorometano fu utilizzato principalmente in Francia per applicazioni di piccole e medie dimensioni, mentre altri fluidi furono usati in misura più limitata, ad esempio gli idrocarburi propano e isobutano (Thevenot, 1979; Fischer, 2004).

#### *Lo sviluppo della pompa di calore: la fase di sviluppo competitivo (1920-1950)*

È il periodo in cui la macchina frigorifera utilizzata come pompa di calore per il riscaldamento degli ambienti e dell'acqua calda sanitaria evolve dai primi rari prototipi verso una soluzione che diverrà sempre più efficiente, affidabile ed economicamente fattibile.

La messa a punto dei refrigeranti sintetici fu la svolta per le macchine a ciclo inverso, in quanto con essi si risolsero le principali problematiche legate all'infiammabilità e alla tossicità dei fluidi naturali. A partire dal 1930, sotto il nome commerciale Freon della multinazionale *DuPont*, i primi clorofluorocarburi, i CFC R11 e R12, fecero il loro ingresso sul mercato. Si tratta di molecole derivanti dal metano e dall'etano per sostituzione degli atomi di idrogeno con atomi di alogeni quali cloro e fluoro. Dal 1945 l'economicità di produzione di questi idrocarburi alogenati si estese anche fuori dagli Stati Uniti.

La svolta per il componente "compressore" si realizzò a partire dagli anni 1920 e fu il motore elettrico sincrono direttamente collegato al compressore, senza trasmissione a cinghia. Altre tipologie di compressore, oltre a quello volumetrico a pistoncini, cominciarono ad essere sviluppate e prodotte con sempre maggiori efficienze ed affidabilità: nel 1920 Rolaff introdusse il compressore a rotore eccentrico mentre *Escher Wyss* nel 1936 realizzò il cosiddetto "Rotasco", in Figura 3, utilizzato poi per la realizzazione della prima pompa di calore europea nel municipio di Zurigo.

Sempre in quel periodo, la *General Electric* iniziò la produzione in serie di compressori ermetici per frigoriferi domestici, mentre la svizzera *Sulzer* iniziò la produzione in grandi volumi del compressore a due cilindri per ammoniaca e anidride carbonica.

Il compressore a palette scorrevoli, precedentemente utilizzato per l'aria, iniziò a essere utilizzato per i refrigeranti a partire dal 1920, per la prima volta in Germania, negli Stati Uniti e in Svizzera. *Brown Boveri*, che dal 1988 è l'*Asea Brown Boveri-ABB*, si concentrò sui turbocompressori e nel 1926 produsse una macchina per l'ammoniaca con compressori da 9,3 MW, seguita da una con compressori di potenza pari a 17,4 MW nel 1927. Lo sviluppo portò a velocità periferiche sempre maggiori, e dopo il 1960 la tendenza è stata un aumento dei compressori monostadio con velocità periferiche vicine al sonico.

Nel 1923, Willis Carrier costruì un prototipo di refrigeratore a turbocompressore radiale utilizzando tetracloruro di carbonio e dicloroetilene, successivamente sostituiti dai CFC R11 e R12. Nel 1934 lo svedese Alf Lysholm sviluppò un profilo praticabile delle viti, curando anche gli aspetti relativi alla fabbricazione e alla lavorazione accurata dei rotori. Ci sarebbero voluti altri quattro decenni per rendere competitiva la tecnologia del compressore a vite.

I piccoli compressori per uso domestico si svilupparono solo 50 - 60 anni dopo il comparto industriale, quando anche il controllo automatico cominciò a diventare sempre più preciso e affidabile.

Dal punto di vista della componentistica, è opportuno citare l'introduzione dello scambiatore a piastre, nel 1923, da parte di Richard Seligman dell'*Aluminium Plant & Vessel Company Limited-APV*. L'innovazione, grazie alle positive caratteristiche dello scambiatore in riferimento all'elevato rapporto tra la superficie di scambio termico e il volume occupato e agli ottimi coefficienti di scambio termico, portò una rivoluzionaria riduzione delle dimensioni e del contenuto di refrigerante nella macchina, anche se con un possibile aumento delle perdite di carico (Hesselgreaves, 2016). Nello stesso periodo fu inventata a Parigi, da E. Diffinger dell'*Etablissement P. Colombier Fils*,

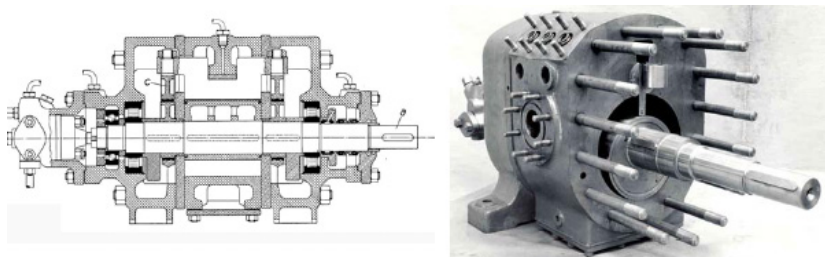


Fig. 3 – Sezione trasversale del compressore Rotasco della Escher Wyss (a sinistra); compressore Rotasco installato nella pompa di calore presso la City Hall di Zurigo nel 1938 (a destra) (Egli, 1940).

la prima valvola di espansione termostatica migliorata da successivi brevetti. Quattro anni dopo, T. Carpenter inventò il tubo capillare come organo di laminazione.

Per quanto concerne infine la macchina ad assorbimento, un forte impulso alla diffusione della tecnologia fu dato dalla svedese *Electrolux* che, nel 1925, acquistò i brevetti di Carl Munters e Baltazar von Platen per la costruzione di un frigorifero ad acqua e ammoniaca. Tra gli aspetti positivi la silenziosità, in quanto funzionava senza parti in movimento, l'utilizzo di gas, cherosene ed elettricità come fonte energetica, e il prezzo basso rispetto a quello degli altri sistemi esistenti.

Sulle piccole taglie, la competizione con le macchine a compressione di vapore cominciò ad essere più difficile con l'arrivo sul mercato di compressori ermetici sempre più economici, silenziosi ed efficienti, che usavano i nuovi refrigeranti sintetici. Iniziò a diffondersi l'interesse per l'uso del calore di scarto in ambito industriale nella refrigerazione ad assorbimento. Nacquero quindi le prime installazioni negli Stati Uniti, in Germania e in Francia; nel 1932, G. Maiuri introdusse in Gran Bretagna la macchina multistadio e nel 1937, Kathabar utilizzò la miscela cloruro di litio-acqua in un sistema ad assorbimento aperto. L'innovazione maggiore nelle macchine ad assorbimento di questo periodo fu lo sviluppo della coppia bromuro di litio-acqua come fluido operativo: Carrier realizzò nel 1945 la prima macchina da 430 kW alimentata a vapore, e nel 1960 aveva già consegnato 1500 macchine di grande taglia. Negli U.S.A. del 1965, il 30% delle macchine frigorifere era del tipo ad assorbimento (Thevenot, 1979; Burget et al., 1999; Nagengast et al., 2006).

Nel periodo a cavallo tra i due conflitti mondiali, fu la Svizzera uno dei primi Paesi a sviluppare l'utilizzo come pompa di calore della macchina a ciclo inverso. Tra il 1938 ed il 1945 furono realizzati 35 impianti a pompa di calore, principalmente da 3 costruttori: Sulzer (Winterthur), Escher Wyss (Zurigo) e Brown Boveri (Baden), utilizzando come sorgenti termiche principalmente acqua di lago, acqua di fiume, acqua di falda e calore di scarto (Thevenot, 1979; Bauer, 1944). I dati salienti di alcuni tra i più importanti impianti realizzati a Zurigo sono riportati in Tabella 1 e in Figura 4.

Anche in Nord America vi fu, a partire dagli anni 1930, un rapido sviluppo: nel 1932, Carrier installò la prima pompa di calore presso la sede principale dell'utility UJI in Giappone. Fino al 1940 negli U.S.A furono installate altre 40 pompe di calore nella fascia di potenza da 25 kW a 1200 kW che, oltre al raffrescamento estivo, offrivano un sistema di riscaldamento invernale che però non aveva ancora un'efficienza molto elevata (Ostertag, 1946; Thevenot, 1979; Groff, 2005). Intorno al 1945, Robert C. Webber ebbe l'idea di utilizzare l'energia termica del sottosuolo, interrando 152 m di tubi di rame a 2 metri di profondità per far evaporare il refrigerante CFC della sua pompa di calore. Nacquero così la pompa di calore geotermica e il sistema a espansione diretta. Un grosso impulso alle pompe di calore negli Stati Uniti fu dato, infine, dalla domanda di condizionatori d'aria monoblocco da finestra per il raffrescamento e il riscaldamento senza fiamma: nel 1947, erano già state vendute 43.000 unità (Nagengast et al., 2006).



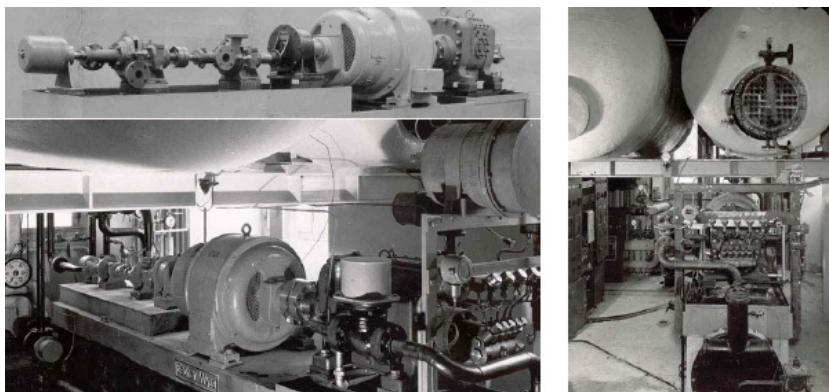
Tab. 1 – Dati di impianti con pompa di calore realizzati a Zurigo tra il 1938 ed il 1945 (Zogg, 2008).

	<i>City Hall</i>	<i>Piscina comunale</i>	<i>Impianto di tele-riscaldamento Walche</i>	<i>Comune</i>
Anno di avvio	1938	1941	1942	1943
Potenza termica totale (kW)	100	1025	5860	1750
Potenza termica unità (kW)	100	325 / 700	2 · 2000 / 1860	1750
Tipo di funzionamento	Riscaldamento Raffrescamento	Riscaldamento	Riscaldamento	Riscaldamento
Tipo di sorgente termica	Acqua di fiume	Recup. termico Acqua di lago	Acqua di fiume	Acqua di fiume
Temperatura della sorgente termica (°C)	7	23 / 7	9 / 9	7
Temperatura del pozzo termico (°C)	60	45 / 50	71 / 71	50
COP		8.0 / 3.5	2.58 / 2.73	4.0
SPF	2.16			
Tipo di compressore	Pistoni	Pistoni	Radiale / pistoni	Pistoni
Refrigerante	R12	NH3	R12 / NH3	NH3
Produttore della pompa di calore	Escher Wyss	Escher Wyss	Brown-Boveri / Sulzer	Escher Wyss

In Europa, val la pena citare la Gran Bretagna, che vide il primo climatizzatore residenziale in pompa di calore realizzato da T.G.N. Haldane nel 1927-28 per riscaldare il suo ufficio di Londra e la sua casa scozzese, e successivamente la *Festival Hall* a Londra, riscaldata tramite una pompa di calore che utilizzava l'acqua del Tamigi come sorgente termica e che era azionata da un turbogas alimentato da gas di città (Thevenot, 1979). In Germania invece l'interesse di K. Nesselmann e W. Niebergall fu rivolto soprattutto alle macchine ad assorbimento funzionanti in pompa di calore, alcune installate a partire dal 1947 per il riscaldamento di liquidi di processo e il riscaldamento degli edifici (Thevenot, 1979).

*Lo sviluppo della pompa di calore: la fase del petrolio a prezzi bassi (1950-1972)*

Gli anni 1950 e 1960 furono caratterizzati da un prezzo del petrolio in continua diminuzione. Di fatto, questo ebbe l'effetto di rallentare drasticamente tutte le attività



*Fig. 4 – Gruppo compressore/motore della pompa di calore sul banco di prova e installata presso la City Hall di Zurigo (a sinistra), rispettivamente in alto e in basso; il gruppo con condensatore aperto, accumulo termico ed evaporatore (a destra) (Zogg, 2008).*

di R&D e quindi la penetrazione nel mercato della pompa di calore nei climi più freddi. Tuttavia, nei climi più miti, dove si presentavano entrambi i fabbisogni di raffrescamento e riscaldamento, le pompe di calore continuarono il loro sviluppo. In quel periodo si iniziò a utilizzare il condizionamento nei veicoli.

Dal punto di vista tecnologico, gli sviluppi in questo periodo furono caratterizzati:

- dall'introduzione dei compressori a vite: grazie all'iniezione di olio fu possibile un aumento significativo del rapporto di compressione, rendendo tale tecnologia maggiormente competitiva. Però solo a partire dagli anni 1980 si ebbe una larga diffusione della tecnologia della vite;
- da miglioramenti significativi negli altri tipi di compressore: nel 1956 la *Sulzer* realizzò il primo compressore a pistoni a labirinto senza olio. I turbocompressori raggiunsero velocità tangenziali della girante intorno a Mach unitario, con un rapporto di compressione di un singolo stadio pari a 8;
- dalla continuazione del successo degli idrocarburi alogenati;
- dall'avvento dei computer tra la fine degli anni 1960 e l'inizio degli anni 1970, utilizzati per la progettazione.

Il periodo fu caratterizzato anche dalle prime attività di ricerca e sperimentazione degli impianti con sonde geotermiche di tipo orizzontale, con la determinazione dei primi valori guida dei coefficienti di scambio termico globali, lunghezza e diametro dei tubi e distanza tra loro. Si intuì anche l'importanza della rigenerazione estiva e degli accumuli di calore latente per incrementare il COP medio stagionale (Ostertag, 1955; Baumann et al., 2007).

In Europa, l'impianto di riscaldamento tipico degli edifici era costituito da radiatori con temperature di mandata e ritorno pari a 80 °C / 60 °C, quindi poco adatto

all'impiego al servizio delle pompe di calore data l'elevata temperatura richiesta di produzione dell'energia termica. In Francia nel 1973 esistevano circa 200 impianti a pompa di calore, mentre in Germania la tecnologia non ebbe diffusione se non per l'uso simultaneo di freddo e caldo nella climatizzazione dei grandi magazzini (Ostertag, 1955; Adolph, 2004; Dienel et al., 2004).

Negli U.S.A. vi fu un lento e graduale sviluppo della pompa di calore, soprattutto nelle medie capacità (12 - 35 kW). Negli anni 1950 le pompe di calore per la produzione di acqua calda sanitaria a 65 °C con accumulo integrato da 300 litri cominciarono a entrare nel mercato. A partire dal 1950 anche in Giappone iniziò a svilupparsi un solido mercato di impianti di climatizzazione con pompa di calore; nel 1957 la potenza totale installata era di 11,6 MW.

Per quanto riguarda la tecnologia dell'assorbimento, nonostante l'ormai prevalere della compressione meccanica, essa mantenne un proprio mercato rivolto, ad esempio, ad applicazioni sensibili al rumore come camere d'albergo e camper, o, in generale, dove fosse disponibile energia termica proveniente da reflui. I bassi prezzi del petrolio favorirono questa tecnologia, che raggiunse il picco negli U.S.A. intorno al 1970 con il 25% del mercato dei refrigeratori.

#### *Lo sviluppo della pompa di calore: la fase dell'entusiasmo e della disillusione (1973-1990)*

Il 1973 segnò una svolta nella storia del secolo scorso: la crisi petrolifera innescata dall'embargo dei paesi arabi dell'OPEC verso il resto del mondo causato dalla guerra del *Kippur* fece prendere coscienza alle nazioni del cosiddetto primo mondo della necessità di imparare a vivere con meno energia in generale, e a ripensare la loro dipendenza dai combustibili fossili. Nacque, in altre parole, il seme della cultura del risparmio energetico, delle fonti energetiche rinnovabili e della sostenibilità, concetti di estrema attualità. La tendenza a un uso più razionale dell'energia fu poi ulteriormente accelerata dalla seconda crisi petrolifera del 1979, dovuta alla guerra tra Iran e Iraq. Fu di questa fase la nascita dell'Agenzia internazionale dell'energia (IEA) e quindi della rinascita dell'interesse verso la tecnologia della pompa di calore (Groff, 2005). Tuttavia, la rapida crescita del mercato ebbe come conseguenza anche l'entrata di diversi attori che non avevano sufficiente esperienza e competenza, anche nel segmento della progettazione ed installazione, con conseguenti efficienze d'impianto decisamente inferiori al dato nominale. Questa fu una delle ragioni, assieme al calo del prezzo del petrolio dopo il 1982, del crollo del mercato europeo alla fine degli anni 1980.

Per quanto riguarda gli aspetti tecnologici, le principali novità furono:

- il successo dei compressori scroll e di quelli a vite, grazie agli enormi sviluppi dei centri di lavorazione meccanica in termini di precisione dei processi di fresatura, rettifica, ecc.;

- il graduale bando dei CFC, determinato dalla scoperta del loro potenziale di distruzione dello strato di ozono, con il conseguente inizio di un processo di sviluppo di nuove molecole che è in atto ancora oggi;
- il successo degli scambiatori di calore a piastre, anch'esso dovuto agli enormi sviluppi dei centri di lavorazione meccanica nel corso degli anni 1970. La sostituzione delle guarnizioni in elastomero con la saldobrasatura a partire da metà degli anni 1980 consentì un ulteriore enorme tasso di diffusione di tale tecnologia (Frommann, 2004);
- la diffusione del microprocessore: tale innovazione consentì non solo di diffondere il controllo di tipo PID, ma anche di poter utilizzare più sensori e attuatori, e quindi di poter controllare molte più variabili e in maniera più precisa.

Nel 1979, il numero stimato di macchine reversibili a compressione meccanica installate nel mondo era di 4 milioni di unità in funzionamento freddo/caldo, e 800.000 unità in modalità solo pompa di calore, comprensive delle macchine per la sola produzione di acqua calda, installate per il 90% negli Stati Uniti, mentre solo il 6,5% era installato in Europa: 6.600 in Svizzera, 13.000 in Francia, 30.000 in Germania, 2.000 in Austria e solo 100 in Italia (Barclay et al. 1978; IEA, 1980).

Per quanto riguarda le macchine ad assorbimento, alcune problematiche tecniche e i costi elevati non convinsero il mercato statunitense ed europeo. Diversa la situazione in Giappone, dove il continuo perfezionamento delle macchine a doppio effetto di grossa taglia portò, nel 1975, il mercato dei refrigeratori ad assorbimento a superare quello delle macchine a compressione meccanica.

#### *Lo sviluppo della pompa di calore: la fase del successo (1990-oggi)*

È la fase dello sviluppo moderno del mercato delle pompe di calore, che diventano sempre più economiche, efficienti e affidabili. La sempre maggior presa di coscienza del cambiamento climatico e dell'inquinamento atmosferico sono dei booster importantissimi per lo sviluppo del mercato, supportato anche dalla nascita dei primi sistemi di incentivazione e da una maggior cultura di questi sistemi anche da parte di progettisti ed installatori.

Dal punto di vista dello sviluppo tecnologico, vi è il superamento dei compressori ermetici scroll su quelli a pistoncini sulle piccole/medie taglie. Motori elettrici sempre più efficienti, tra cui i nuovi motori a magneti permanenti, contribuiscono a un ulteriore aumento dell'efficienza. Vi è una forte riscoperta dei refrigeranti naturali, soprattutto a causa del continuo processo di phase-out di CFC e HCFC e dei nuovi sostituti, gli HFC, che, pur avendo generalmente un ottimo comportamento dal punto di vista dell'efficienza energetica del ciclo termodinamico, presentano un elevato potenziale di riscaldamento globale e una elevata persistenza in atmosfera dei prodotti della loro decomposizione (Singh Gaur et al., 2021).

L'ulteriore diffusione dello scambiatore a piastre, l'introduzione dei microcomputer, la nascita e la diffusione di Internet con la conseguente possibilità di monitoraggio e controllo da remoto delle macchine e degli impianti, assieme alle sempre più frequenti attività di ricerca e sviluppo in collaborazione tra università ed industria, hanno consentito il moderno sviluppo della pompa di calore.

### *Conclusioni: uno sguardo al futuro*

Il 2020 è stato l'ottavo anno di crescita consecutiva, il sesto a due cifre, del mercato europeo delle pompe di calore, arrivando a 1,5 milioni di unità vendute. L'esperienza da diversi mercati nazionali mostra che la crescita a doppia cifra è compatibile con la capacità produttiva e di installazione dell'industria del settore, il che è fondamentale per il raggiungimento, da qui ai prossimi anni, degli obiettivi di riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> e aumento della quota di energia da fonti rinnovabili. Il futuro potrebbe riservare:

- passaggio a un nuovo modello di business: l'attuale modello (produttore della pompa di calore che vende all'installatore che vende all'utilizzatore finale, il quale è il proprietario dell'impianto e ne paga anche i costi operativi) potrebbe essere utilmente sostituito in futuro da un modello che preveda, da parte dell'utente finale, l'acquisto (a una tariffa flat) del "servizio caldo/freddo", che verrebbe fornito da un soggetto che si occuperebbe in toto della progettazione e fornitura dell'impianto/macchina;
- sviluppo di sistemi "intelligenti" e integrati con la rete, con il sistema edificio/impianto che, grazie all'inerzia e agli accumuli, potrebbe fornire servizi "ancillari" per la regolazione del sistema elettrico nazionale e contribuire alla riduzione dei costi per il servizio di dispacciamento.

Tutto questo ovviamente presuppone l'utilizzo di tecnologie avanzate, ma già disponibili, relative ai sensori e alle reti di telecomunicazione (Internet Of Things). Alcune possibili criticità legate a una massiccia diffusione delle pompe di calore, quali ad esempio l'incremento della domanda di potenza elettrica negli edifici e la diminuzione della prestazione energetica in presenza di basse temperature dell'ambiente esterno, potranno essere fronteggiate mediante, rispettivamente, un ulteriore incremento della diffusione delle rinnovabili e l'utilizzo di impianti di produzione termica ibridi.

### *Bibliografia*

- Adolph U. 2004. Die Kältetechnik und das Energieproblem: die 1970er Jahre. In: *Der DKV und die Geschichte der deutschen Kälte- und Klimatechnik* (H.L. Dienel, E. Prandner, M. Pühl M. eds.), 105-137. Stuttgart: Alfons W. Gentner.
- Barclay J.A. 1978. The Design and Performance of a Magnetic Refrigerator and Heat Engine. In: *Progress in Refrigeration Science and Technology, Proceedings of the 15th International Congress of Refrigeration, Venice, 1, 1-7.*

- Bauer B. 1944. Das Wärmepump-Ergänzungswerk des Fernheizkraftwerkes (FHK) der ETH. Schweizerische Bauzeitung, 123(5), 52-55.
- Baumann M., Laue H.-J., Müller P. 2007. Informationspaket Wärmepumpe – Heizen mit Umweltwärme, 4th ed., BINE Informationsdienst, FIZ Karlsruhe.
- Burget L.W., Byars M.D., Schultz K. 1999. Absorption Systems: The Future, more than a Niche?. In: Proceedings of the International Sorption Heat Pump Conference, Munich, 13-24.
- Cashflo. 2007. *The History of Some Compressor Types*, www.cashflo.co.uk.
- Dienel H.-L., Prandner E., Pühl M. (ed.) 2004. *Der DKV und die Geschichte der deutschen Kälte- und Klimatechnik*. Stuttgart: Alfons W. Gentner.
- Egli M. 1940. Die Wärmepumpen-Heizung des renovierten zürcherischen Rathauses. Schweizerische Bauzeitung, 116(6), 59-64; 116(7), 73-75.
- Fischer B. 2004. *Die Kältetechnik und der DKV 1909-1945* In: *Der DKV und die Geschichte der deutschen Kälte- und Klimatechnik* (H.L. Dienel, E. Prandner, M. Pühl M. eds.), 11-56. Stuttgart: Alfons W. Gentner.
- Friotherm. 2008. *History from Sulzer Brothers to Friotherm*, www.friotherm.com and private communications, Andreas Rindisbacher, Friotherm, CH-8401 Winterthur.
- Frommann A. 2004. Das Umweltproblem und die Suche nach neuen Geschäftsfeldern: die 1980er Jahre In: *Der DKV und die Geschichte der deutschen Kälte- und Klimatechnik* (H.L. Dienel, E. Prandner, M. Pühl M. eds.), 138-159. Stuttgart: Alfons W. Gentner.
- Grassi W. 2018. *Heat Pumps. Fundamentals and Applications*. Berlin: Springer.
- Groff G.C. 2005. Heat Pumps – who Uses them and why?. In: Proceedings of the 8th IEA Heat Pump Conference, Las Vegas, IEA Heat Pump Centre.
- Hesselgreaves et al. 2016. *Compact Heat Exchangers*, Elsevier (Buterworth-Heinemann).
- IEA. 1980. *Common Study on Advanced Heat Pump Systems*, Final report, International Energy Agency, Paris.
- Kläy H.R. 1994. *Franz Burckhardt und August Burckhardt – Maschinenbauer aus Basel*. Meilen: Verein für wirtschaftshistorische Studien.
- Linde. 2004. 125 Jahre Linde – eine Chronik. Linde AG, Wiesbaden, www.linde.com.
- Nagengast B., Groff G.C., Kraus E. 2006. *Air Conditioning and Refrigeration Chronology*. Atlanta: ASHRAE.
- Ostertag A. 1946. Die Wärmepumpe für Raumheizung in den U.S.A. Schweizerische Bauzeitung, 127(20), 249-251.
- Ostertag A. 1955. Über die Anwendung der Wärmepumpe zur Raumheizung, editorial contribution. Schweizerische Bauzeitung, 73(7), 88-90.
- Singh Gaur A., Fitiwi D.Z., Curtis J. 2021. Heat pumps and our low-carbon future: A comprehensive review. *Energy Research & Social Science*, 71, 101764.
- Thevenot R. 1979.. *A History of Refrigeration Throughout the World*. Paris: IIR.
- Thomson W. 1852. On the Economy of Heating and Cooling of Buildings by Means of Currents of Air. *Proceedings of the Philosophical Society*, 3, 269-272.
- Weightman G. 2003. *The Frozen Water Trade*. London: Harper Collins.
- Wirth E. 1955. Aus der Entwicklungsgeschichte der Wärmepumpe. Schweizerische Bauzeitung, 73(52), 647-650.
- Zogg M. 2008. *History of Heat Pumps. Swiss Contributions and International Milestones*. Technical report. Berne: Swiss Federal Office of Energy.