



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale Ingegneria Civile e Ambientale

**Innovazione tecnologica ed efficienza energetica negli
elettrodomestici da incasso dell'ultimo decennio (2015–2025)**

**Technological innovation and energy efficiency in
recessed appliances of the last decade (2015–2025)**

Relatore:
Prof. Giorgio Passerini

Tesi di Laurea di:
Matteo Ciarrocchi

A.A. 2025/2026

A Greta,

perché mentre io raggiungevo un traguardo, tu mi davi una lezione di vita.

Mi hai insegnato che il coraggio non è l'assenza della paura, ma la scelta di affrontarla ogni giorno.

Grazie per avermi mostrato la forza, la speranza e l'amore anche nei momenti più difficili.

INDICE

INTRODUZIONE	5
CAPITOLO 1	
1.1 Il ruolo degli elettrodomestici nei consumi energetici domestici europei	7
1.2 Evoluzione dei consumi dal 2015 al 2025	10
1.3 Quadro normativo europeo: Ecodesign, etichettatura energetica e strategie per la transizione	13
CAPITOLO 2	
2.1 Principi di funzionamento e componenti del ciclo frigorifero	16
2.2 Evoluzione tecnologica: compressori inverter, No-Frost e controllo elettronico	21
2.3 Tecnologie emergenti: refrigerazione magnetocalorica e a stato solido	26
2.4 Efficienza energetica nei frigoriferi moderni	29
CAPITOLO 3	
3.1 Evoluzione tecnologica e andamento dei consumi delle lavastoviglie	31
3.2 Tecnologie di ottimizzazione: sensori di carico, programmi eco e recupero del calore	35
3.3 La tecnologia Zeolite per l'asciugatura	39
3.4 Benefici energetici e ambientali	41
CAPITOLO 4	
4.1 Panoramica dei sistemi di cottura domestici e confronto tecnologico	42
4.2 Piani a induzione: principi fisici, componenti ed efficienza	46
4.3 Forni domestici: isolamento, ventilazione e controllo elettronico	53
4.4 Cappe: classificazione, sensoristica e integrazione con i piani cottura	58
4.5 Impatto energetico complessivo della cucina domestica	62

CAPITOLO 5

5.1 Intelligenza artificiale e IoT negli elettrodomestici 67

5.2 Nuovi materiali isolanti ad alta efficienza 70

CAPITOLO 6

6.1 Sintesi dei risultati 74

6.2 Impatto dell'innovazione tecnologica sui consumi 75

6.3 Limiti dello studio e sviluppi futuri della ricerca 78

CONCLUSIONI 80

BIBLIOGRAFIA 81

INTRODUZIONE

Il settore domestico-residenziale ha un ruolo fondamentale nell'attuale transizione energetica europea, incidendo in modo significativo sulla domanda elettrica complessiva. Sebbene il dibattito pubblico si concentri spesso sulle politiche di generazione di elettricità e sulle fonti rinnovabili, il cuore del problema risiede nell'efficienza degli utilizzi finali: gli elettrodomestici.

Il presente lavoro nasce dalla volontà di unire la mia esperienza lavorativa a quella accademica e dalla necessità di superare una visione semplificata dell'efficienza energetica, spesso ridotta alla sola classificazione riportata sull'etichetta di conformità, per indagare i vincoli termodinamici e operativi reali che governano il consumo di questi dispositivi.

L'analisi condotta in questo elaborato si basa su una premessa critica: il miglioramento prestazionale degli elettrodomestici non è un processo lineare guidato solo dal progresso tecnologico, ma un equilibrio complesso tra ottimizzazione dei cicli termodinamici, gestione dei flussi di calore e comportamento dell'utente finale. Si osserva, infatti, come le innovazioni introdotte nell'ultimo decennio — dai compressori a inverter alle tecnologie di asciugatura a zeolite, fino ai sistemi di induzione — abbiano spostato la frontiera dell'efficienza verso limiti prossimi alla reversibilità. Tuttavia, queste innovazioni pongono nuove sfide, non solo in termini di complessità tecnologica e manutenzione, ma anche di integrazione all'interno di reti domestiche sempre più interconnesse (IoT).

Il presente studio si propone dunque di analizzare l'evoluzione tecnologica degli elettrodomestici nel decennio 2015-2025 da un punto di vista termico ed energetico. Attraverso un approccio multidisciplinare, che unisce l'analisi dei bilanci energetici con l'esame del quadro normativo europeo, il lavoro esplora come la ricerca di una maggiore sostenibilità si scontri spesso con i limiti fisici intrinseci ai processi di trasformazione energetica.

Infine, si valuterà se il contributo dell'intelligenza artificiale e dei nuovi materiali isolanti possa effettivamente rappresentare una vera svolta per il prossimo salto di qualità o se ci

stiamo avvicinando a un fermo tecnologico, dove l'ulteriore guadagno in efficienza risulta marginale rispetto alle risorse necessarie per ottenerlo.

La struttura della tesi parte dall'analisi dei principi termodinamici dei cicli frigoriferi e prosegue con lo studio delle lavastoviglie e dei sistemi di asciugatura avanzati, analizza successivamente i sistemi di cottura quali piani a induzione, forni e le cappe aspiranti, per concludersi con una valutazione critica dell'integrazione dei sistemi intelligenti e del loro impatto sui consumi energetici nel settore domestico europeo.

CAPITOLO 1

1.1 Il ruolo degli elettrodomestici nei consumi energetici domestici europei

Gli elettrodomestici rappresentano uno dei principali strumenti attraverso cui i consumatori europei definiscono la propria impronta ambientale. Nel settore residenziale europeo, gli apparecchi domestici sono responsabili di circa il 25–30% dei consumi elettrici totali delle abitazioni (Eurostat, 2023), un dato che li rende un obiettivo prioritario di qualsiasi politica di efficienza energetica. La crescente diffusione di apparecchiature elettroniche nelle abitazioni, associata all'aumento della domanda energetica globale, ha reso necessario lo sviluppo di strumenti normativi e tecnologici finalizzati alla riduzione dei consumi e delle emissioni che alterano il clima.

Gli obiettivi fissati dall'Agenda 2030 delle Nazioni Unite attribuiscono un ruolo rilevante all'efficienza energetica degli elettrodomestici, in particolare il raggiungimento dell'SDG 7 (energia pulita e accessibile) passa necessariamente per la riduzione dei consumi degli apparecchi di uso quotidiano, mentre l'SDG 12 (consumo e produzione responsabili) impone una riflessione critica sull'intero ciclo di vita dei prodotti, dalla produzione alla dismissione, includendo tutte le risorse e le emissioni associate.

In questo scenario, il miglioramento delle prestazioni energetiche degli apparecchi elettrodomestici costituisce uno degli strumenti più efficaci per ridurre l'impatto ambientale del settore residenziale.

La valutazione della sostenibilità associata ad essi non può limitarsi alla sola fase di utilizzo finale, ma deve considerare differenti livelli di valutazione: la scala micro (relativa all'efficienza del singolo prodotto), la scala meso (riferita al mix energetico utilizzato) e la scala macro (che comprende fattori socioeconomici, modelli di consumo e dimensioni del parco elettrodomestici europeo). Inoltre, l'impatto ambientale deve essere valutato lungo l'intero ciclo di vita del prodotto, includendo produzione, trasporto, utilizzo, manutenzione e smaltimento.

Negli ultimi decenni, la diffusione sempre più capillare degli elettrodomestici, sia nei Paesi industrializzati sia in quelli emergenti, ha determinato un incremento significativo della

domanda energetica globale. Già tra il 2015 e il 2020 era stato stimato un aumento dei consumi energetici associati agli apparecchi domestici pari a circa il 37%, evidenziando la necessità di adottare strategie di contenimento sempre più efficaci, ma allo stesso tempo una traiettoria preoccupante che rischia tuttavia di essere parzialmente sottostimata se non si considera il cosiddetto “*rebound effect*” o “*effetto rimbalzo*”. Questo fenomeno descrive il paradosso per cui i guadagni di efficienza ottenuti sui singoli dispositivi vengono in parte annullati dall'aumento del numero di apparecchi per nucleo familiare e dall'incremento delle ore d'uso, rendendo i progressi tecnologici da soli insufficienti a garantire una riduzione netta dei consumi complessivi.

In tale contesto, il comportamento del singolo consumatore e l'utilizzo dell'energia elettrica assumono un ruolo determinante, poiché anche apparecchi tecnologicamente efficienti possono risultare poco sostenibili se impiegati in modo scorretto o inefficiente.

Lo studio del JRC (Joint Research Centre) evidenzia come l'impronta ecologica complessiva degli elettrodomestici europei superi ancora i cosiddetti “confini planetari”, rendendo necessarie strategie integrate basate sul miglioramento dell'efficienza energetica, sull'estensione della vita utile dei prodotti e sulla promozione di modelli di consumo più sostenibili. In quest'ottica, il concetto di economia circolare e di progettazione ecocompatibile ha assunto un ruolo centrale nelle politiche europee.

Un passaggio fondamentale in questa direzione è rappresentato dalla Direttiva Ecodesign 2009/125/CE, che ha introdotto requisiti minimi di progettazione per numerose categorie di prodotti connessi all'energia. Parallelamente, altre strategie considerate efficaci comprendono l'allungamento della vita utile degli apparecchi, la riduzione del numero di dispositivi per nucleo familiare e, dove possibile, forme di utilizzo condiviso.

Nello scenario europeo, uno degli strumenti più importanti per orientare il mercato verso prodotti più efficienti è rappresentato dall'etichettatura energetica. L'etichetta energetica dell'Unione Europea è stata introdotta negli anni Novanta, inizialmente per i frigoriferi nel 1994, con l'obiettivo di fornire ai consumatori finali informazioni chiare e comparabili sui consumi energetici degli apparecchi domestici. Nel corso degli anni, il sistema ha

progressivamente ampliato il proprio ambito di applicazione, diventando uno degli strumenti più riconoscibili e influenti delle politiche energetiche europee.

Come già anticipato, l'efficacia di questi strumenti normativi dipende in maniera significativa dal comportamento del consumatore stesso.

Secondo un sondaggio Eurobarometro del 2024 sull'energia, il 93% dei cittadini europei riconosce l'etichetta energetica dell'UE e il 75% dichiara che essa ha influenzato le proprie decisioni di acquisto negli ultimi cinque anni. Questo dato evidenzia come la trasparenza informativa possa contribuire concretamente alla diffusione di comportamenti di consumo più consapevoli e sostenibili.

L'adozione di elettrodomestici più efficienti produce benefici significativi non solo dal punto di vista ambientale, ma anche economico.

Secondo il rapporto europeo “Ecodesign Impact Accounting Overview Report 2024”, il risparmio medio annuale ottenuto dalle famiglie europee grazie alle Normative e all'etichettatura energetica era compreso tra € 182 e € 266 nel 2020; entro il 2030 tale valore potrebbe aumentare fino a un intervallo compreso tra € 473 e € 736 annui per famiglia.

Oltre alla riduzione dei consumi domestici, queste politiche contribuiscono a stimolare l'innovazione industriale e la competitività europea. La crescente domanda di prodotti energeticamente efficienti incoraggia infatti i produttori a investire nello sviluppo di tecnologie avanzate, materiali innovativi e sistemi intelligenti per la gestione energetica. In questo modo, le politiche europee in materia di efficienza energetica si configurano non solo come strumenti di tutela ambientale, ma anche come leve strategiche per la crescita economica e per il raggiungimento dell'obiettivo europeo della neutralità climatica entro il 2050.

È in questo quadro, fatto di normative, dinamiche di mercato e comportamenti individuali, che si inserisce l'analisi sviluppata nei capitoli successivi, dedicata all'evoluzione tecnologica degli elettrodomestici dell'ambiente cucina e al loro contributo nella riduzione dei consumi energetici nel settore residenziale.

1.2 Evoluzione dei consumi dal 2015 al 2025

Il decennio compreso tra il 2015 e il 2025 ha rappresentato una fase di profonda trasformazione del consumo energetico a livello globale, con dinamiche significative nel settore residenziale. Secondo le principali statistiche sull'energia elaborate da organismi internazionali, la domanda energetica mondiale ha mostrato una tendenza complessivamente crescente, pur registrando variazioni rilevanti legate a fattori esterni, tra cui la pandemia da COVID-19 nel biennio 2020-2021, e ai progressivi effetti delle politiche di efficientamento energetico adottate dai principali paesi industrializzati (IEA, 2023) (fig. 1). In Europa, i consumi finali di energia elettrica nel settore domestico hanno evidenziato una lenta ma costante riduzione pro-capite, riconducibile sia alla diffusione di apparecchiature a maggiore efficienza energetica, sia all'introduzione di normative sempre più stringenti in materia di etichettatura energetica e standard minimi di prestazione.

Ad ogni modo, in questo decennio i consumi energetici associati agli elettrodomestici e ai dispositivi elettrici ed elettronici domestici hanno mostrato un'evoluzione complessa, caratterizzata da dinamiche apparentemente contraddittorie tra miglioramento dell'efficienza tecnologica e aumento della domanda complessiva di energia. Le evidenze riportate nelle statistiche energetiche europee e nella letteratura scientifica suggeriscono infatti che la riduzione dei consumi unitari dei singoli apparecchi non si sia sempre tradotta in una diminuzione dei consumi totali del settore residenziale. Ciò rende necessaria una distinzione tra un livello “macroscopico”, dove i dati evidenziano nei mercati una progressiva stabilizzazione della curva della domanda e un livello di “dettaglio”, dove occorre porre massima attenzione ai cosiddetti «consumi invisibili», spesso non percepiti dall'utente finale. Questi ultimi determinano una differenza sostanziale tra il consumo del singolo elettrodomestico e il consumo dell'intero gruppo di dispositivi elettrici ed elettronici presenti in un singolo contesto residenziale.

Un contributo determinante a questa evoluzione è stato fornito dalla progressiva attenzione rivolta ai consumi in modalità stand-by degli apparecchi domestici. Come evidenziato da Gheorghe et al. (2025), il cosiddetto *stand-by power*, ovvero il consumo energetico residuo degli apparecchi non in uso attivo, rappresenta una fonte persistente di spreco energetico, con un'incidenza stimabile tra il 10% e il 15% del fabbisogno elettrico complessivo di

un'abitazione (fig.2). Nel periodo considerato, l'implementazione di strategie tecnologiche emergenti, quali i sistemi di gestione intelligente dell'energia, l'integrazione con la *smart grid* e gli interventi centrati sul comportamento degli utenti, ha contribuito a ridurre sensibilmente tale quota (Gheorghe et al., 2025). Parallelamente, le politiche dell'Unione Europea — in particolare il Regolamento (CE) n. 1275/2008 e i successivi aggiornamenti introdotti nell'ambito dell'*Ecodesign Working Plan* — hanno fissato limiti sempre più restrittivi ai consumi in stand-by, spingendo i produttori verso soluzioni progettuali più efficienti.

Un ulteriore elemento strutturale che ha condizionato l'evoluzione dei consumi nel periodo 2015-2025 è rappresentato dal fenomeno dell'obsolescenza degli elettrodomestici e dei dispositivi elettronici. Karagiannopoulos et al. (2024) propongono un approccio basato su una Programmazione Lineare Intera (ILP) per ottimizzare il ciclo di vita degli apparecchi domestici in funzione sia dei vincoli economici del consumatore sia delle soglie di consumo energetico, dimostrando come la gestione strategica dell'obsolescenza possa incidere significativamente sui consumi di un'abitazione. L'accelerazione dei cicli di sostituzione dei prodotti ha generato un duplice effetto sul bilancio energetico del settore residenziale: da un lato, ha favorito il rinnovo del parco macchine con apparecchiature di nuova generazione e classi energetiche superiori; dall'altro, ha alimentato una crescente produzione di rifiuti elettronici (RAEE), con impatti rilevanti in termini di energia grigia incorporata e costi ambientali del ciclo di vita dei prodotti (Karagiannopoulos et al., 2024). L'analisi congiunta di questi fattori, evoluzione statistica dei consumi, riduzione dei consumi passivi e dinamiche di obsolescenza, ci dà un quadro articolato e multidimensionale dell'attuale transizione energetica nel settore domestico. L'evoluzione dei consumi tra il 2015 e il 2025 segna il passaggio da una visione puramente focalizzata sull'efficienza del singolo utilizzo, alla necessità di un approccio sistemico, in cui la reale riduzione dell'impatto energetico dipende dal bilanciamento tra le prestazioni avanzate dei prodotti e la loro durabilità nel tempo, unite poi ad un comportamento ed una consapevolezza da parte dei consumatori.



Figura 1 - Evoluzione del consumo energetico finale del settore residenziale nell'Unione Europea nel periodo 2015–2023, espressa in milioni di terajoule (TJ). Il picco registrato nel 2021 (11,0 milioni di TJ) è attribuibile alla combinazione di un inverno particolarmente rigido e all'effetto rimbalzo post-pandemia; il successivo calo nel biennio 2022–2023 riflette l'impatto delle misure di contenimento adottate in risposta alla crisi energetica e delle condizioni climatiche più miti. I valori relativi al periodo 2015–2020 sono stimati sulla base delle tendenze riportate da Eurostat; i dati 2021–2023 sono confermati dalla fonte ufficiale. *Fonte: Elaborazione dell'autore su dati Eurostat, 2024.*

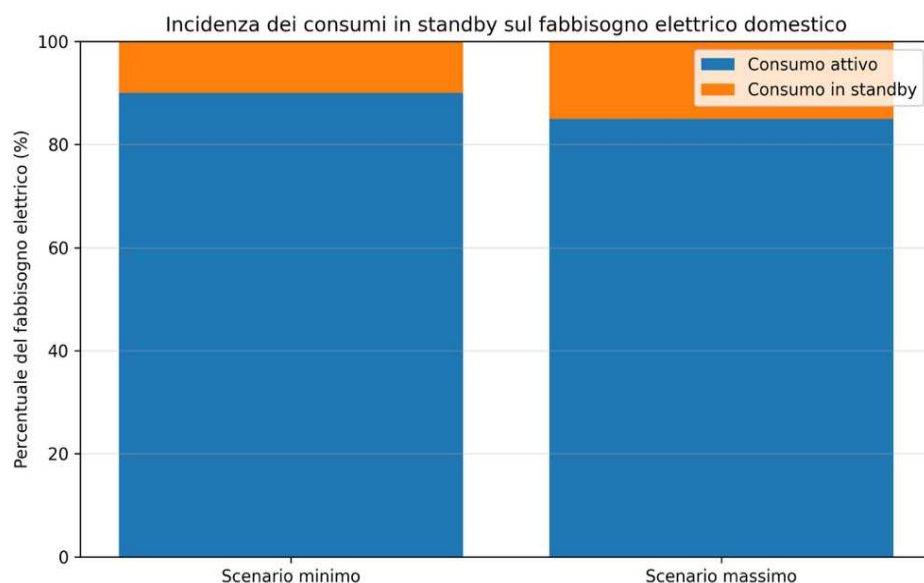


Figura 2 - Incidenza percentuale del consumo in modalità standby sul fabbisogno elettrico complessivo di un'abitazione tipo, secondo uno scenario minimo (10%) e uno scenario massimo (15%). La quota residua rappresenta il consumo attivo, ovvero l'energia effettivamente impiegata durante il funzionamento dei dispositivi. Il dato evidenzia la rilevanza dei cosiddetti "consumi invisibili" nel bilancio energetico domestico. *Fonte: Elaborato dell'autore su Gheorghe, A. C., Andrei, H., Diaconu, E., & Andrei, P. C. (2025). Energies, 18(4), 965.*

1.3 Quadro normativo europeo: Ecodesign, etichettatura energetica e strategie per la transizione

Il percorso europeo verso un miglioramento dell'efficienza energetica dei prodotti si basa su una legislazione costruita attorno a due logiche complementari: da un lato, l'eliminazione progressiva delle tecnologie inefficienti dal mercato (*market push*); dall'altro, l'orientamento consapevole dei consumatori verso le soluzioni più virtuose (*market pull*). Queste due logiche si traducono in tre pilastri normativi che agiscono in sinergia tra di loro e che hanno ridisegnato profondamente il panorama industriale e commerciale del settore.

Il primo e più strutturale di questi pilastri è rappresentato dalla Direttiva Ecodesign (2009/125/CE) e dai regolamenti attuativi che ne derivano. Questo strumento interviene alla base del ciclo produttivo, imponendo ai produttori di elettrodomestici l'integrazione di requisiti minimi obbligatori di prestazione energetica e funzionale già nella fase di progettazione del prodotto. In altri termini, un dispositivo che non soddisfa determinate soglie prestazionali produttive non può essere legalmente immesso sul mercato. Per molte categorie di grandi elettrodomestici, ciò ha comportato il progressivo bando delle classi energetiche più basse, tagliando di fatto la "coda" del mercato e impedendo la sopravvivenza delle tecnologie obsolete. L'Ecodesign, tuttavia, non si limita all'efficienza energetica in senso stretto, infatti i recenti aggiornamenti normativi hanno esteso il suo campo d'azione ai principi dell'economia circolare, introducendo requisiti vincolanti in materia di durabilità, riparabilità e disponibilità dei pezzi di ricambio per un periodo minimo garantito.

A questo proposito si collega il secondo pilastro, basato sui regolamenti sui consumi in stand-by a partire dal Regolamento (CE) n. 1275/2008 fino alle successive revisioni. Questi atti normativi fissano soglie massime all'assorbimento energetico passivo dei dispositivi elettrici ed elettronici quando si trovano in stato di inattività. Se il consumo di un singolo apparecchio in modalità di attesa appare trascurabile, la sua moltiplicazione per le centinaia di milioni di unità in uso nell'Unione Europea genera un carico cumulativo tutt'altro che irrilevante: secondo le stime della Commissione Europea, i cosiddetti *carichi fantasma* (*phantom loads*), ovvero i prelievi elettrici non associati ad alcuna funzione attiva dell'apparecchio, incidono per circa il 5-10% del consumo elettrico domestico totale nell'UE,

un volume paragonabile alla produzione annua di diverse centrali di media taglia¹. Intervenire su questo fattore spesso invisibile all'utente, si è rivelata una delle misure più rapide ed economicamente vantaggiose per alleggerire il carico di base della rete europea. Con la progressiva diffusione dell'Internet of Things (IoT), la normativa è stata ulteriormente estesa per regolamentare il cosiddetto *networked stand-by*: la condizione, sempre più comune, di dispositivi che rimangono costantemente connessi alla rete pur senza svolgere funzioni operative, mantenendo attivi moduli di comunicazione wireless che generano un assorbimento continuo e quasi mai percepibile dall'utente finale.

Il terzo pilastro del sistema è costituito dal Regolamento (UE) 2017/1369 sull'Etichettatura Energetica, che agisce come principale leva di mercato, orientando le scelte di acquisto attraverso la trasparenza informativa. L'intervento normativo più rilevante introdotto da questo regolamento è la reintroduzione di nuove classi energetiche: le vecchie etichette, che nel tempo avevano proliferato in classi intermedie come A+, A++ e A+++, avevano progressivamente saturato la fascia alta, rendendo le distinzioni tra i prodotti scarsamente leggibili per il consumatore medio (fig. 3 e tab. 1). La riforma ha ripristinato la scala originale da A a G, eliminando i segni "+" e recuperando immediatezza visiva (oltre ad una più facile lettura da parte del consumatore). Una strategia adottata è stata quella di lasciare vuota la classe A — e in alcuni casi anche la B — al momento del lancio della nuova etichetta: questo accorgimento non è meramente estetico, ma ha una funzione di stimolo all'innovazione, riservando le fasce di eccellenza ai prodotti che l'industria non ha ancora sviluppato (o sta sviluppando) e incentivando così la ricerca tecnologica come condizione necessaria per raggiungere i livelli più alti della classificazione (tab. 1 per il confronto dei consumi per classe).

A completare il sistema interviene il codice QR integrato nella nuova etichetta, che collega direttamente il consumatore alla banca dati pubblica EPREL (*European Product Database for Energy Labelling*) (fig. 3). Attraverso questo registro, è possibile accedere in tempo reale alle schede tecniche complete di ciascun prodotto, verificandone le specifiche dichiarate e confrontando modelli diversi in modo trasparente e verificabile. La combinazione tra la

¹ Il dato si riferisce alle stime contenute nel documento di valutazione d'impatto allegato alla revisione del Regolamento (CE) n. 1275/2008, elaborato dalla Commissione Europea nell'ambito del programma Ecodesign.

semplicità comunicativa dell'etichetta e la profondità informativa del database digitale trasforma l'etichettatura energetica da semplice obbligo di conformità a infrastruttura abilitante per un consumo più consapevole, capace di tradurre la transizione ecologica europea in scelte quotidiane accessibili a tutti i cittadini.

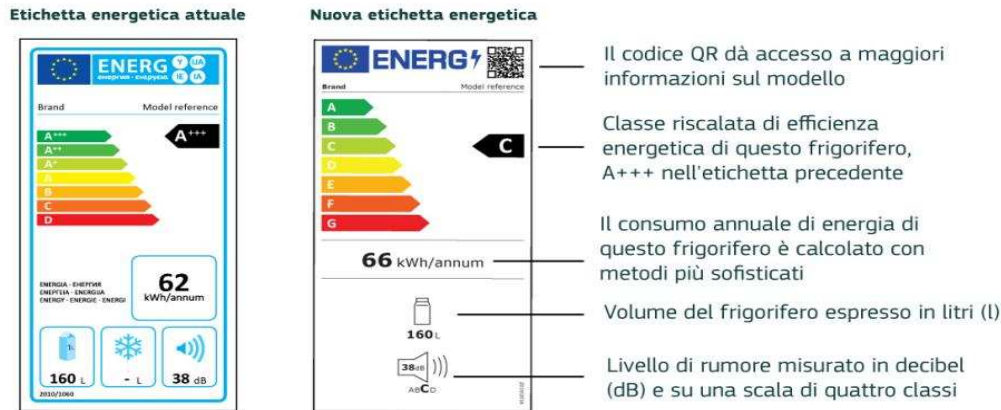


Figura 3 - Evoluzione del sistema di etichettatura energetica nell'Unione Europea: il passaggio al nuovo schema di classificazione. Processo di "riscaldamento" introdotto dal Regolamento (UE) 2017/1369. Tale transizione è volta a superare la saturazione delle classi dotate di suffissi (A+, A++, A+++), ripristinando una scala lineare da A a G. La nuova configurazione, che prevede classi superiori inizialmente non occupate, è concepita per stimolare l'innovazione tecnologica e garantire una maggiore trasparenza informativa per il consumatore. *Fonte: Elaborato dell'autore su dati tratti da ENEA, "L'Etichetta Energetica 2021".*

Classe	Consumo kWh/anno	Costo per l'energia elettrica (*€/anno)
A	UGUALE/INFERIORE A 100	UGUALE/INFERIORE A 19€
B	da 124 a 101	da 24 a 19 €
C	da 155 a 125	da 30 a 24 €
D	da 194 a 156	da 37 a 30 €
E	da 243 a 195	da 46 a 37 €
F	da 303 a 244	da 58 a 46 €
G	SUPERIORE A 303	SUPERIORE A 58 €

*costo di 1 kWh: 0,19 euro

Tabella 4 - Parametri di efficienza e assorbimento energetico: associazione tra classi di prestazione e consumi standardizzati. La tabella sintetizza la correlazione tra le classi energetiche, definite su scala A-G, e i consumi elettrici misurati in condizioni di laboratorio standardizzate. Tali valori, che costituiscono la base per la classificazione dei prodotti, evidenziano l'impatto dei requisiti di progettazione ecocompatibile (Ecodesign) nell'orientare il mercato verso dispositivi a minore intensità energetica. Si specifica che il consumo reale dell'apparecchio può variare in funzione delle abitudini d'uso dell'utente finale. *Fonte: Elaborato dell'autore su dati tratti da ENEA, "L'Etichetta Energetica 2021".*

CAPITOLO 2

2.1 Principi di funzionamento e componenti del ciclo frigorifero

La macchina frigorifera, da un punto di vista termodinamico, può essere vista come una macchina termica che lavora con un ciclo inverso. La sua funzione consiste nel trasferire energia termica (calore) da una sorgente a temperatura inferiore T_1 , corrispondente all'ambiente refrigerato, verso una sorgente a temperatura superiore T_2 , rappresentata dall'ambiente esterno (Çengel e Boles, 2022; Sacchi e Cecconi, 2019).

Questo processo avviene in direzione opposta rispetto al flusso spontaneo del calore. Secondo l'enunciato di Clausius del Secondo Principio della Termodinamica, infatti, il calore non può fluire spontaneamente da un corpo a temperatura minore verso uno a temperatura maggiore. Di conseguenza il trasferimento di energia termica dalla sorgente fredda alla sorgente calda richiede necessariamente l'apporto di un lavoro meccanico esterno al sistema (Clausius, 1850).

La macchina frigorifera opera mediante un ciclo termodinamico inverso che, nei diagrammi di stato p-v e T-s, risulta percorso in senso antiorario. Stabilita la necessità di fornire lavoro esterno, il limite teorico massimo delle prestazioni frigorifere può essere dedotto dal teorema di Carnot (Bejan, 2016; Çengel e Boles, 2022).

Il teorema di Carnot afferma che nessuna macchina termica che opera tra due sorgenti a temperatura costante può avere un rendimento superiore a quello di una macchina reversibile che opera tra le stesse sorgenti (Carnot, 1824; Bejan, 2016).

Per una macchina termica diretta reversibile, il rendimento massimo teorico risulta:

$$\eta_{Carnot} = 1 - T_1/T_2$$

dove:

- T_2 rappresenta la temperatura assoluta della sorgente calda (K);
- T_1 rappresenta la temperatura assoluta della sorgente fredda (K).

Nel caso delle macchine frigorifere il parametro che indica la loro prestazione non è il rendimento termico, bensì il coefficiente di prestazione, o “Coefficient Of Performance” (COP), definito come il rapporto tra il calore sottratto alla sorgente fredda e il lavoro meccanico richiesto per realizzare il ciclo:

$$COP = Q_1/W$$

dove:

- Q_1 è il calore assorbito dall’ambiente refrigerato (J);
- W è il lavoro fornito al compressore (J).

Per una macchina frigorifera reversibile operante secondo il ciclo inverso di Carnot, il COP massimo teorico assume la forma:

$$COP_{Carnot} = T_1/(T_2 - T_1)$$

Il COP di una macchina reale risulta sempre inferiore a quello della corrispondente macchina reversibile operante tra le stesse sorgenti termiche:

$$COP_{Reale} \leq COP_{Carnot}$$

A differenza del rendimento delle macchine termiche dirette, il COP può assumere valori maggiori di 1 perché non misura una conversione di energia, ma misura il trasferimento di energia termica mediante una quantità di lavoro esterno. L’espressione del COP evidenzia inoltre che le prestazioni (teoriche) della macchina aumentano al diminuire della differenza di temperatura ($T_2 - T_1$) (Bejan, 2016; Çengel e Boles, 2022).

Ad esempio, un frigorifero domestico che lavora con temperatura interna pari a 4 °C e temperatura ambiente pari a 25 °C presenta una differenza termica relativamente contenuta, quindi avrà valori teorici di COP significativamente superiori all’unità.

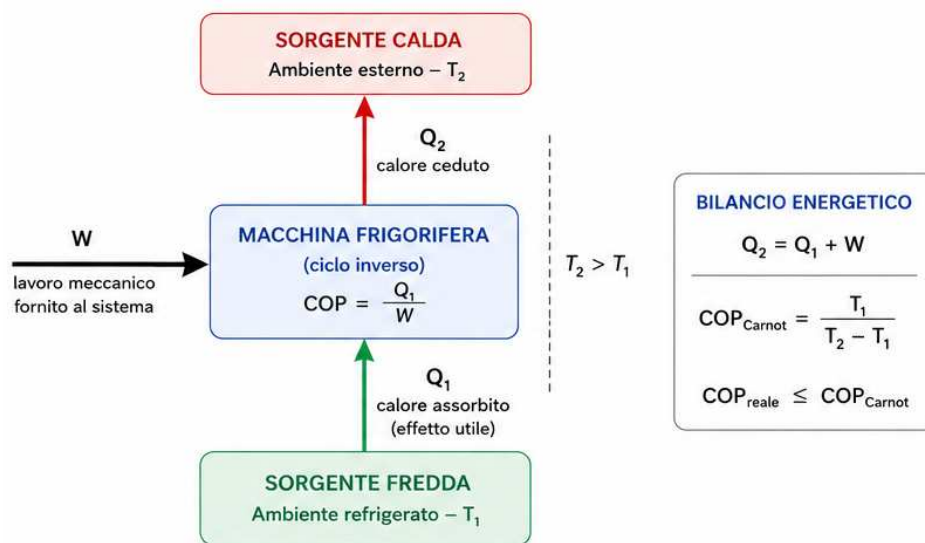


Figura 5 - Schema energetico di una macchina frigorifera operante in ciclo inverso. *Fonte: Elaborato dell'autore*

La macchina ideale che realizza tale limite teorico è la macchina frigorifera di Carnot inversa, costituita da quattro trasformazioni reversibili. Per una massa unitaria di fluido refrigerante, il ciclo può essere descritto come segue (Carnot, 1824; Bejan, 2016).

Nel tratto $4 \rightarrow 1$ il fluido subisce una compressione adiabatica reversibile, cioè isentropica. In assenza di scambi termici con l'esterno ($\delta Q = 0$), la pressione e la temperatura aumentano da p_1, T_1 a p_2, T_2 .

Nel tratto $1 \rightarrow 2$ il fluido cede calore alla sorgente calda mediante una trasformazione isoterma reversibile alla temperatura costante T_2 .

Nel tratto $2 \rightarrow 3$ avviene un'espansione adiabatica reversibile, anch'essa isentropica, durante la quale il fluido si raffredda fino a riportarsi alla temperatura T_1 .

Infine, nel tratto $3 \rightarrow 4$ il fluido assorbe calore dalla sorgente fredda attraverso una trasformazione isoterma reversibile alla temperatura costante T_1 .

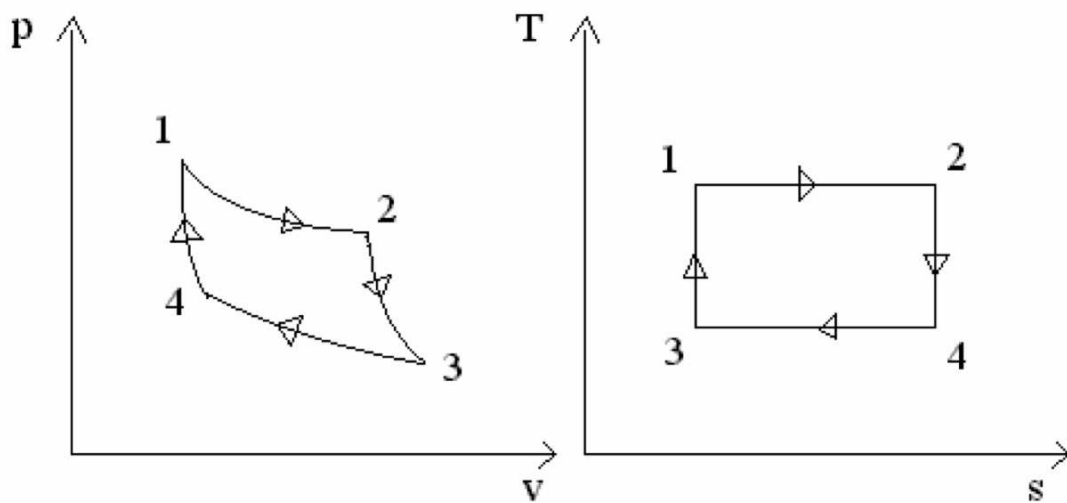


Figura 6 - Rappresentazione del ciclo inverso di Carnot nei diagrammi p-V e T-s. Il ciclo è costituito da due trasformazioni isoterme e due trasformazioni adiabatiche reversibili (isentropiche) e rappresenta il limite teorico superiore delle prestazioni frigorifere. *Fonte: Elaborato dell'autore.*

La reversibilità del ciclo implica che la variazione complessiva di entropia del fluido lungo un ciclo completo sia nulla. Avremo quindi:

$$Q_1/T_1 = Q_2/T_2$$

relazione coerente con l'uguaglianza di Clausius per i cicli reversibili:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = 0$$

(Bejan, 2016; Clausius, 1850).

Il ciclo inverso di Carnot ci dà una rappresentazione teorica di un modello termodinamico ideale che tuttavia non può essere adottato negli apparecchi frigoriferi reali (questo perché entrano in gioco diversi fattori trascurati nella parte teorica). Ad esempio, se comprimo un fluido che è vicino alla saturazione posso compromettere l'integrità del compressore, mentre l'espansione isentropica richiederebbe dispositivi di espansione molto complessi e poco economici.

Per tali ragioni, gli impianti frigoriferi reali operano generalmente secondo il ciclo a compressione di vapore, derivato concettualmente dal ciclo inverso di Carnot ma

caratterizzato da trasformazioni differenti e dalla presenza di irreversibilità (Çengel e Boles, 2022; Sacchi e Cecconi, 2019).

Il ciclo a compressione di vapore si realizza attraverso quattro componenti fondamentali.

L'evaporatore è lo scambiatore di calore nel quale il fluido frigorifero, a bassa pressione e temperatura, assorbe il calore Q_1 dall'ambiente refrigerato evaporando a pressione pressoché costante.

Il compressore aspira il vapore proveniente dall'evaporatore e ne aumenta pressione e temperatura attraverso un lavoro meccanico. A causa delle irreversibilità fluidodinamiche e meccaniche, la compressione reale non risulta perfettamente isentropica.

Nel condensatore il fluido cede il calore Q_2 all'ambiente esterno, condensando a pressione quasi costante e tornando allo stato liquido.

Infine, la valvola di laminazione realizza una brusca riduzione di pressione mediante un processo approssimativamente isoentalpico ($h = \text{cost}$). La diminuzione di pressione provoca l'evaporazione parziale del fluido refrigerante, che ritorna all'evaporatore in condizioni di miscela bifase (Çengel e Boles, 2022; Sacchi e Cecconi, 2019).

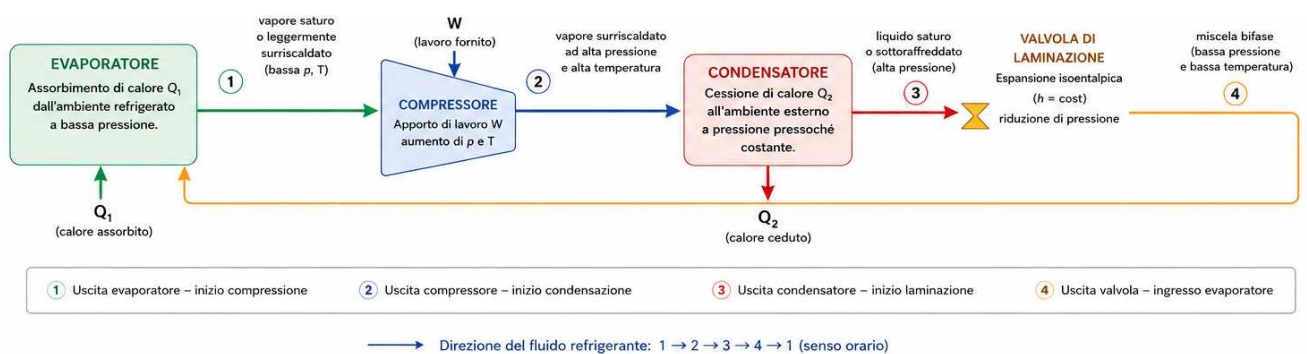


Figura 7 - Schema del ciclo frigorifero a compressione di vapore. Il fluido frigorifero attraversa evaporatore, compressore, condensatore e valvola di laminazione, realizzando il trasferimento di calore dall'ambiente refrigerato all'ambiente esterno.
Fonte: Elaborato dell'autore.

Il funzionamento del ciclo dipende in maniera significativa dalle proprietà termofisiche del fluido frigorifero. Il trasferimento di calore nell'evaporatore e nel condensatore sfrutta infatti il calore latente associato ai cambiamenti di fase liquido-vapore e vapore-liquido, consentendo di assorbire e cedere elevate quantità di energia a temperatura pressoché costante (Mastrullo, Mazzei e Vanoli, 2010).

La scelta del fluido frigorifero costituisce quindi un aspetto fondamentale nella progettazione degli impianti frigoriferi. Il fluido deve possedere determinate proprietà termodinamiche, stabilità chimica, compatibilità con i materiali del circuito, ridotto impatto ambientale e condizioni di sicurezza accettabili in termini di tossicità e infiammabilità.

A partire dal Protocollo di Montreal del 1987 e dalle successive normative europee sui gas fluorurati, la selezione dei refrigeranti è stata progressivamente orientata verso sostanze caratterizzate da basso potenziale di riduzione dello strato di Ozono (ODP) e ridotto potenziale di riscaldamento globale (GWP), spostando la scelta dai clorofluorocarburi (CFC) agli idrofluorocarburi (HFC), fino agli attuali idrofluoroolefine (HFO) e ai refrigeranti naturali (ASHRAE, 2022).

L'evoluzione tecnologica dei moderni sistemi frigoriferi si è infine concentrata sull'incremento dell'efficienza energetica e sul miglioramento del controllo dinamico del ciclo, attraverso soluzioni come la modulazione di capacità mediante compressori inverter e i sistemi No-Frost per la gestione termoigrometrica degli ambienti refrigerati (ASHRAE, 2022; Çengel e Boles, 2022).

2.2 Evoluzione tecnologica: compressori inverter, No-Frost e controllo elettronico

Il passaggio dai modelli tradizionali ai moderni sistemi di refrigerazione domestica rappresenta un punto cruciale dell'evoluzione ingegneristica, che cerca di ridurre al minimo le irreversibilità termodinamiche intrinseche dei cicli reali a compressione di vapore, con l'obiettivo di ottimizzare le prestazioni complessive e avvicinarsi il più possibile ai valori ideali descritti dal ciclo inverso di Carnot (Moran et al., 2018). Questa spinta verso l'innovazione è strettamente guidata dalla necessità di soddisfare al meglio i requisiti internazionali di ecodesign e di etichettatura energetica (European Commission, 2019;

Fridges and Freezers Energy Labelling, 2021). Tali normative hanno imposto una radicale trasformazione tecnologica, trasformando il frigorifero da una semplice macchina termica statica a un sistema energetico dinamico e ottimizzato.

Nei sistemi di refrigerazione convenzionali, la regolazione termica si basa su controlli di tipo ON/OFF gestite da termostati meccanici. Quando la temperatura interna supera una soglia prefissata, il compressore si attiva immediatamente alla massima potenza nominale, per poi spegnersi una volta raggiunto il target termico. Questo funzionamento ad intermittenza si allontana parecchio dalle condizioni ideali di massima efficienza teorica, poiché gli avviamenti frequenti generano elevate correnti di spunto con picchi di assorbimento elettrico, causano variazioni periodiche della temperatura interna e causano differenziali di pressione transitori che penalizzano l'efficienza globale del ciclo. Inoltre, i continui cicli di accensione e arresto aumentano l'usura dei componenti meccanici, riducendo la vita utile dell'intera macchina (Moran et al., 2018).

L'introduzione dei compressori a velocità variabile controllati tramite tecnologia inverter — in particolare i modelli alternativi a corrente continua senza spazzole (Brushless DC o BLDC) — ha permesso di superare queste complicazioni dei sistemi ON/OFF, portando il funzionamento della macchina a delle condizioni vicine al regime stazionario (Implementation for Inverter Controlled Domestic Refrigerator/Freezer, 2018; Performance Evaluation of a Variable Speed DC Compressor, 2019). Il principio di funzionamento del sistema inverter si basa sulla capacità di variare la velocità di rotazione del motore elettrico modulando la frequenza della corrente di alimentazione (Habibollahzade et al., 2015; Yang et al., 2017).

La relazione fondamentale che descrive la velocità del motore sincrono è:

$$n = (60 \cdot f)/p$$

dove n rappresenta la velocità di rotazione del compressore espressa in giri al minuto (RPM), f è la frequenza della corrente elettrica di alimentazione in Hertz (Hz) e p è il numero di coppie polari del motore. La tecnologia inverter modifica la frequenza f , facendo variare la

velocità del pistone all'interno del compressore e, di conseguenza, la quantità di fluido refrigerante movimentata nel circuito.

Dal punto di vista fisico, la potenza frigorifera trasferita dall'evaporatore dipende direttamente dalla portata massica secondo la relazione:

$$Q_{dot} = m_{dot} \cdot \Delta h$$

dove Q_{dot} rappresenta la potenza frigorifera trasferita (W), m_{dot} è la portata massica del refrigerante (kg/s) e Δh è la variazione di entalpia specifica del fluido nell'evaporatore (J/kg) (Jang et al., 2014).

Quando la temperatura interna è distante dal set-point, la centralina innalza la frequenza per incrementare la portata massica e la capacità frigorifera; man mano che la temperatura si stabilizza, il compressore riduce progressivamente i giri, regolando la potenza in funzione del reale carico termico richiesto (Intelligent Control Based on Usage Habits, 2020; Jang et al., 2014).

Questo tipo di funzionamento continuo a basso regime permette di ridurre efficacemente i consumi di energia complessivi, i quali possono essere quantificati dall'integrale della potenza nel tempo:

$$E = \int P(t)dt$$

e minimizza lo stress meccanico sui componenti (Miller & Miller, 2018).

L'abbattimento dei gradienti termici tra il refrigerante e l'ambiente circostante permette inoltre di incrementare il coefficiente di prestazione effettivo del sistema COP (già introdotto nel paragrafo 2.1.).

Oltre all'evoluzione dei motori inverter, un'altra tecnologia che ha contribuito in modo significativo al miglioramento dell'efficienza energetica dei frigoriferi è rappresentata dalla tecnologia No-Frost. Nei frigoriferi tradizionali, l'umidità interna tende a condensare e a solidificare sulle superfici fredde dell'evaporatore quando la temperatura scende sotto il

punto di congelamento dell'acqua. La brina così formata agisce come una vera e propria barriera isolante a causa della sua bassa conducibilità termica ($k \approx 0,1 - 0,2 \text{ W/mK}$), aggiungendo quindi un'ulteriore resistenza termica al sistema:

$$R = \delta / (k \cdot A)$$

dove δ è lo spessore dello strato di ghiaccio e A è la superficie di scambio (Mills, 2018).

Lo scambio termico convettivo e globale attraverso l'evaporatore viene quindi descritto dalle seguenti equazioni:

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot \Delta T_{ml}$$

$$\dot{Q} = h \cdot A \cdot (T_s - T_a)$$

dove U è il coefficiente globale di scambio, h è il coefficiente di scambio convettivo, ΔT_{ml} è la differenza di temperatura media logaritmica tra il refrigerante e l'aria, mentre T_s e T_a sono rispettivamente le temperature della superficie e dell'aria.

L'incremento della resistenza termica R dovuto alla brina riduce il coefficiente globale U , quindi il compressore è costretto a lavorare a temperature di evaporazione più basse per poter garantire lo stesso flusso termico $\dot{Q}$, andando a diminuire l'efficienza del ciclo.

Il sistema No-Frost elimina radicalmente questo problema integrando cicli di sbrinamento automatici e un sistema a ventilazione forzata. L'aria dei vari compartimenti viene convogliata tramite ventilatori verso l'evaporatore, dove viene raffreddata e deumidificata prima di essere reimpressa in modo uniforme.

Questo schema riduce i fenomeni di stratificazione termica verticale, un problema particolarmente evidente nelle configurazioni di tipo “bottom mount” (posizione del vano frigorifero superiore e vano congelatore inferiore). (Analysis of the Temperature Stratification of a No-Frost Domestic Refrigerator with Bottom Mount Configuration, 2021; Kim et al., 2021).

L'interazione tra tecnologia inverter e sistema No-Frost viene gestita da un controllo elettronico avanzato dove la centralina, attraverso una rete di sensori fisici di temperatura, umidità e carico termico, rileva in tempo reale le condizioni operative dell'elettrodomestico, modulando dinamicamente l'azione del compressore, delle ventole e delle resistenze di sbrinamento.

Le soluzioni tecnologiche più recenti implementano algoritmi di Machine Learning e modelli di previsione in grado di generare dei "sensori virtuali", capaci di stimare con precisione i parametri termici interni riducendo al minimo la necessità di utilizzare una sensoristica fisica complessa, migliorando così l'affidabilità e contenendo i consumi (Asare et al., 2020; Machine Learning-Based Virtual Sensors for Reduced Energy Consumption in Frost-Free Refrigerators, 2022).

Nelle moderne architetture definite “Smart-Fridge”, il controllo si estende fino a fare un'analisi delle abitudini dell'utente, monitorando parametri quali la frequenza di apertura delle porte, che incide in modo significativo nel consumo energetico, e i carichi termici periodici (Beheshti et al., 2021; SmartFridge: The Intelligent System that Controls your Fridge, 2023).

L'algoritmo di previsione anticipa la richiesta energetica, modificando dinamicamente la frequenza dell'inverter e programmando i cicli di sbrinamento solo quando strettamente necessario. L'utilizzo combinato dei principi della termodinamica, dell'automazione e della gestione energetica consente di avere un funzionamento reale prossimo ai limiti teorici del ciclo inverso di Carnot, garantendo un incremento sostanziale dell'efficienza energetica, della durata dei componenti e della sostenibilità ambientale.

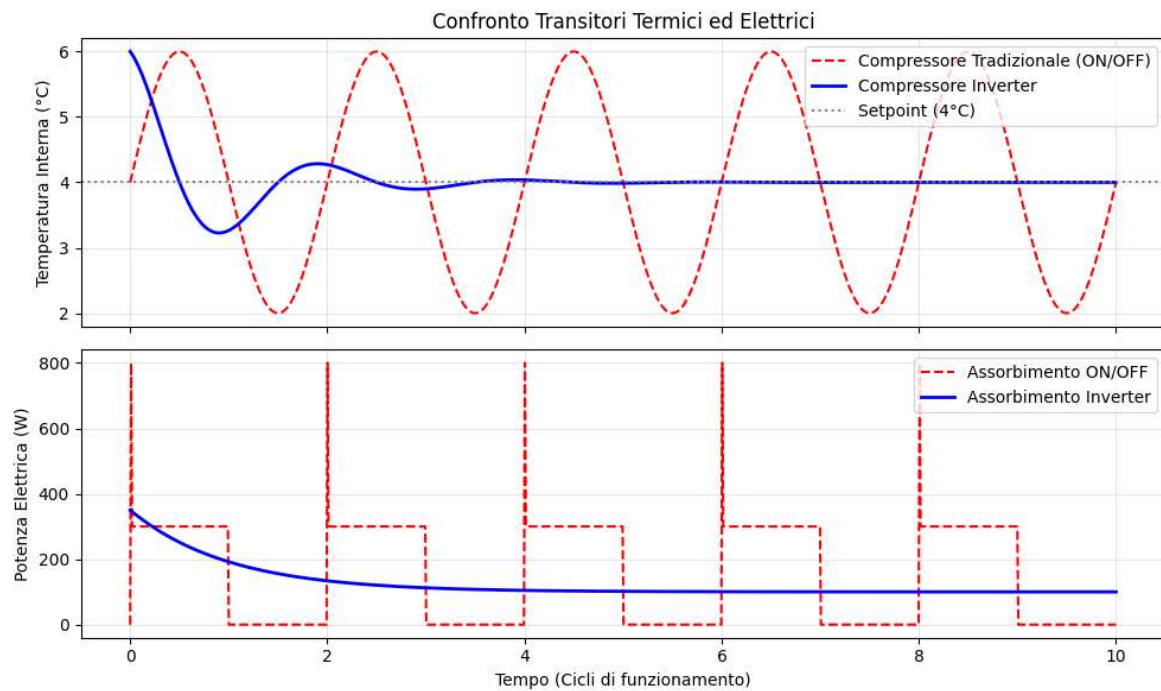


Figura 8 - Confronto tra transitori termici e assorbimento elettrico nei sistemi di refrigerazione ON/OFF e inverter. La figura mostra il confronto dinamico tra un sistema di refrigerazione tradizionale con compressore ON/OFF e un sistema a velocità variabile (inverter), sia in termini di andamento della temperatura interna (grafico superiore) sia di assorbimento elettrico (grafico inferiore). Nel caso ON/OFF si osservano oscillazioni periodiche attorno al setpoint di 4 °C, dovute al funzionamento discontinuo del compressore, con conseguenti picchi di potenza e fasi di inattività. Al contrario, il sistema inverter evidenzia un comportamento transitorio smorzato, con progressivo avvicinamento al regime stazionario e riduzione della potenza assorbita, garantendo una maggiore stabilità termica e un migliore utilizzo energetico rispetto alla logica tradizionale. *Fonte: Elaborato dell'autore.*

2.3 Tecnologie emergenti: refrigerazione magnetocalorica e a stato solido

Tra le nuove tecnologie capaci di ridurre ulteriormente i consumi energetici e l'impatto ambientale, sta emergendo come valida alternativa la refrigerazione a stato solido, la quale rappresenta un'importante innovazione poiché sostituisce il refrigerante fluido e il compressore con materiali funzionali in grado di generare variazioni termiche mediante l'utilizzo di campi esterni (Lin et al., 2024).

Tra le nuove tecnologie emerge anche la refrigerazione magnetocalorica, che sfrutta il cosiddetto effetto magnetocalorico, ovvero la variazione di temperatura (reversibile) che si manifesta in alcuni materiali magnetici quando sono sottoposti a un campo magnetico variabile. Durante la magnetizzazione il materiale magnetocalorico, che senza l'applicazione

del campo ha un grande disordine magnetico e quindi una grande entropia, tende a riscaldarsi per effetto dell'allineamento dei momenti magnetici interni, questo perché l'entropia magnetica diminuisce e viene compensata da un aumento della temperatura, mantenendo così costante l'energia del sistema. Quando il campo viene rimosso, il materiale assorbe calore dall'ambiente circostante e ritorna allo stato iniziale.

Dal punto di vista termodinamico, questo fenomeno permette quindi di realizzare un ciclo frigorifero simile ai cicli convenzionali, ma è basato sullo scambio di entropia magnetica e non sul compressore e l'espansione di un fluido refrigerante (Aprea et al., 2020).

L'effetto magnetocalorico può essere descritto quantitativamente attraverso la variazione adiabatica di temperatura del materiale, correlata alla variazione della magnetizzazione in funzione della temperatura e del campo magnetico applicato. Tale relazione può essere espressa nel seguente modo:

$$\Delta T_{ad} = -(T/CH) \cdot (\partial M/\partial T) \cdot H \cdot \Delta H$$

dove ΔT_{ad} rappresenta la variazione di temperatura adiabatica del materiale magnetocalorico, T è la temperatura assoluta, CH è la capacità termica a campo magnetico costante, M è la magnetizzazione del materiale, H è il campo magnetico applicato e ΔH rappresenta la variazione del campo magnetico. Questa espressione evidenzia come l'effetto refrigerante dipende sia dalle proprietà magnetiche intrinseche del materiale, sia dalla sua risposta termica al campo applicato (Aprea et al., 2020).

Una parte fondamentale nello studio e nello sviluppo dei refrigeratori magnetocalorici è rappresentata dalla “rigenerazione termica”, necessaria per aumentare il range di temperatura ottenibile dal materiale magnetocalorico.

I primi sistemi si sono basati principalmente su rigeneratori magnetici attivi, noti come “Active Magnetic Regenerator” (AMR), dove un fluido “termovettore” veicolava il calore tra il materiale magnetocalorico e le sorgenti termiche. Nonostante questa configurazione abbia permesso di raggiungere importanti risultati, essa ha trovato alcune limitazioni legate alle perdite relative al fluido, alle resistenze al trasferimento termico e ai limiti sulla frequenza operativa del ciclo (Lin et al., 2024).

Gli studi più recenti si stanno concentrando verso dispositivi completamente “solid-state”, dove il processo di rigenerazione viene affidato direttamente all’interazione tra materiali solidi con diverse proprietà termiche. Particolare attenzione viene posta sul concetto di “Hybrid Magnetic Regenerator”, che combina materiali magnetocalorici con elementi ad alta conducibilità termica, ottenendo una distribuzione del gradiente di temperatura più efficace oltre ad una significativa riduzione delle perdite causata dalla presenza di volumi inattivi o fluidi intermedi. Questa teoria consente di aumentare la frequenza di funzionamento e migliorare la densità di potenza dell’intero sistema frigorifero. (Lin et al., 2024).

Un ulteriore sviluppo riguarda l’integrazione di modelli numerici avanzati per la progettazione di refrigeratori magnetocalorici compatti. Studi basati su modelli bidimensionali di dispositivi solid-state hanno evidenziato come l’impiego di materiali con proprietà termiche anisotrope e strutture capaci di favorire il trasferimento direzionale del calore possa migliorare la separazione tra zona fredda e zona calda. In questo contesto, l’introduzione di elementi assimilabili a “diodi termici” consente di controllare il flusso di calore in modo selettivo, avvicinando il comportamento del dispositivo a un sistema di gestione termica intelligente e reversibile (Cirillo et al., 2023).

Dal punto di vista pratico, la refrigerazione magnetocalorica a stato solido presenta diversi vantaggi rispetto ai sistemi tradizionali: l’assenza di compressori meccanici riduce vibrazioni e rumorosità, oltre all’inevitabile usura dei compressori stessi, i quali poi devono essere eventualmente sostituiti, mentre l’eliminazione dei refrigeranti convenzionali permette di limitare l’utilizzo di sostanze con potenziale impatto ambientale. Tuttavia, la tecnologia necessita ancora di ulteriori miglioramenti relativi alla disponibilità dei materiali magnetocalorici, alla gestione dei costi dei magneti permanenti e alla realizzazione di dispositivi che siano delle dimensioni adatte alle applicazioni domestiche e industriali (Lin et al., 2024; Lin et al., 2026).

In prospettiva, la refrigerazione magnetocalorica e più in generale le tecnologie caloriche a stato solido rappresentano un possibile superamento dell’approccio tradizionale basato sulla compressione del refrigerante, configurandosi come soluzioni promettenti per sistemi frigoriferi più efficienti, compatti e sostenibili.

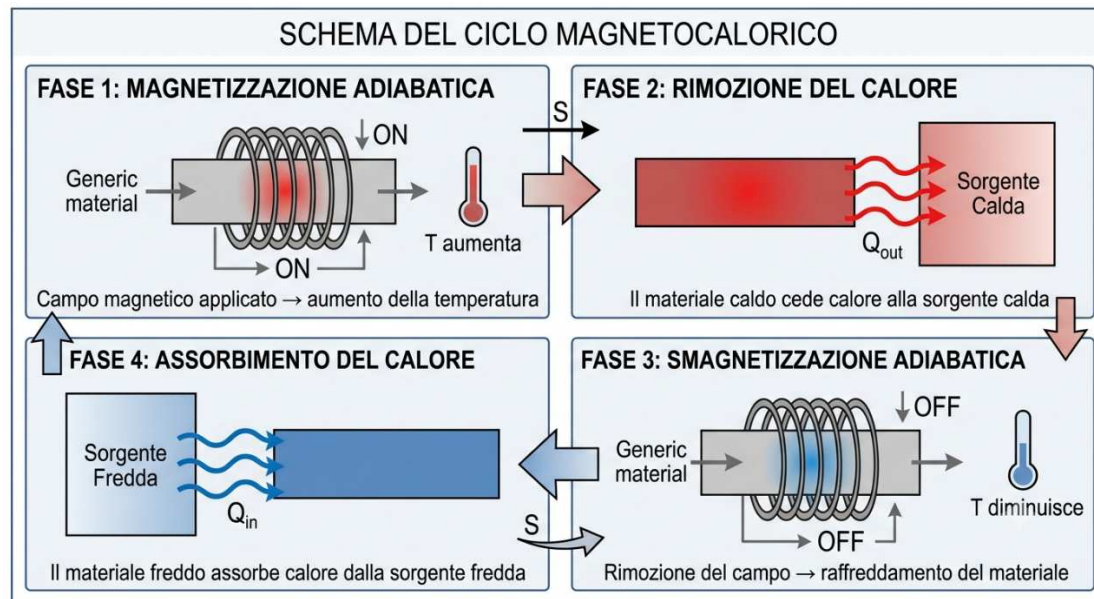


Figura 9 - Principio di funzionamento di un ciclo frigorifero magnetocalorico basato sulla variazione di entropia magnetica del materiale attivo. Questa figura collegherebbe bene il discorso al ciclo di Carnot già introdotto, facendo vedere che anche qui esiste una sequenza ciclica, ma il "componente attivo" non è un gas refrigerante. *Fonte: Elaborato dell'autore.*

2.4 Efficienza energetica nei frigoriferi moderni

L'evoluzione dei sistemi di refrigerazione domestica nel decennio 2015-2025 è stata caratterizzata da un importante perfezionamento del ciclo a compressione di vapore. Come analizzato nei paragrafi precedenti, l'integrazione di sistemi di sbrinamento avanzati No-Frost e l'impiego di compressori con tecnologia inverter hanno consentito di ridurre i consumi transitori e di modulare la potenza frigorifera in funzione del carico termico reale. Queste ottimizzazioni hanno garantito un miglioramento delle prestazioni su base annua, massimizzando l'efficienza dello scambio termico e riducendo le fluttuazioni e le variazioni di temperatura nelle celle.

Tuttavia, un'analisi termodinamica di dettaglio evidenzia come la tecnologia a compressione di vapore stia ormai raggiungendo un limite asintotico di ottimizzazione, infatti i margini di incremento del Coefficiente di Prestazione (COP) stanno diventando sempre più ristretti, vincolati dalle irreversibilità intrinseche dei componenti meccanici e dalle specifiche proprietà termofisiche dei fluidi refrigeranti. L'attuale transizione verso refrigeranti a basso

potenziale di riscaldamento globale (GWP), pur essendo ecologicamente meno impattante, comporta alcuni compromessi tecnici che ostacolano ulteriori innalzamenti del rendimento di secondo principio (η_{II}), rendendo i miglioramenti sempre meno rilevanti.

In questa prospettiva le tecnologie a stato solido, in particolare la refrigerazione magnetocalorica, rappresentano il nuovo significativo cambio tecnologico. L'eliminazione del compressore meccanico e l'adozione di metodologie di scambio termico diretto solido-solido permettono di by-passare le perdite di carico viscosi e le irreversibilità legate all'espansione dei fluidi tipiche del ciclo di Carnot (reale). Nonostante sia una tecnologia ancora in fase di sviluppo, per un discorso legato sia ai costi dei materiali stessi che alla difficoltà nello sviluppo di diodi termici ad alta efficienza, rimane comunque una delle alternative più promettenti per ottenere un concreto salto prestazionale.

Si può pertanto concludere che, ad oggi, i frigoriferi moderni di fascia alta rappresentano il massimo livello di efficienza del ciclo tradizionale, ma la vera sfida ingegneristica per l'abbattimento dei consumi risiede nella diffusione su larga scala delle tecnologie emergenti. Valutare criticamente tali limiti e potenzialità risulta fondamentale non solo per quantificare le prestazioni del singolo elettrodomestico, ma anche per analizzare il suo contributo all'interno del bilancio termico ed energetico dell'ambiente domestico, un aspetto che assume una certa rilevanza per l'analisi dell'impatto complessivo dei sistemi di conservazione e cottura.

CAPITOLO 3

3.1 Evoluzione tecnologica e andamento dei consumi delle lavastoviglie

L'evoluzione tecnologica degli elettrodomestici rappresenta un fattore determinante nel calcolo delle prestazioni energetiche all'interno delle abitazioni. La lavastoviglie è un esempio di come l'ottimizzazione meccanica e termodinamica abbia influenzato non solo l'efficienza delle risorse, ma anche la progettazione degli spazi abitativi interni. I primi prototipi, nati dai brevetti di fine Ottocento (Cochrane, 1886) e sviluppati nel primo dopoguerra (Livens, 1924), erano stati concepiti come apparecchi voluminosi e rumorosi di tipo *freestanding*, che costringevano a relegare la cucina in un locale di servizio separato dalla zona giorno. Oggi invece sono più diffusi i modelli a scomparsa totale (*full-integrated*) con un livello delle emissioni sonore contenute (molto spesso inferiore ai 40 dB), dando spazio alla progettazione di una cucina *open-space* integrata nel *living*.

A questa transizione tecnologica si è unita una significativa riduzione dei consumi. A livello macroscopico, il settore residenziale è responsabile di circa il 26,2% del consumo finale di energia nell'Unione Europea (Eurostat, 2023). Sebbene il riscaldamento rappresenti la quota maggioritaria (62,3%), il comparto dell'illuminazione e dei grandi elettrodomestici costituisce una frazione pari al 14,5%. A questo proposito, i dati del Joint Research Centre (JRC, 2024) evidenziano un crollo dei consumi specifici della lavastoviglie: tra il 1990 e il 2020, il consumo medio per ciclo è sceso da 1,4 kWh a circa 0,8 kWh (-34%), mentre il prelievo idrico è passato da 30 litri a circa 10 litri (-58%), come illustrato nella **Figura 10**.

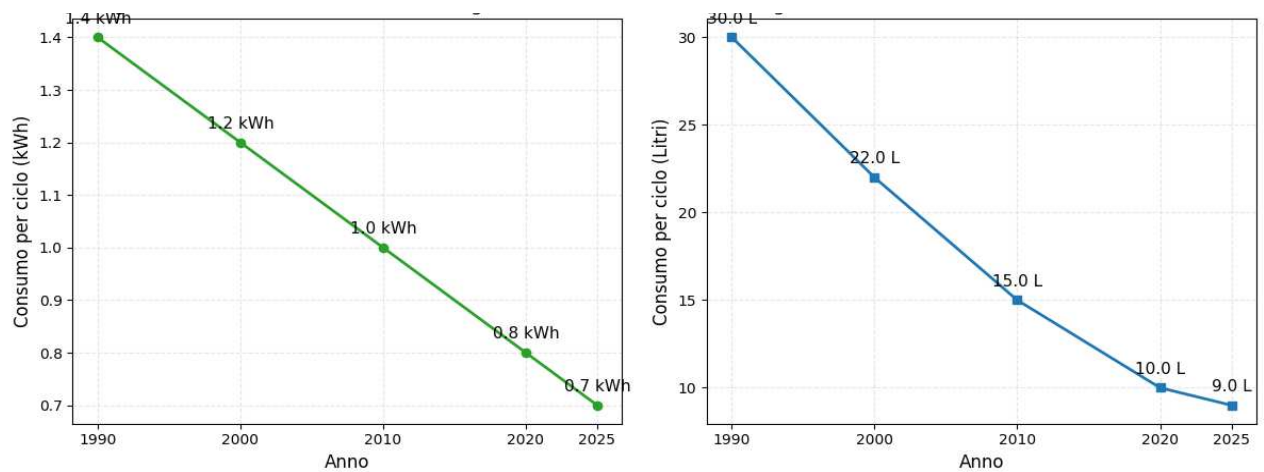


Figura 10 – consumo medio kWh e L per ciclo dal 1990 – 2025. Fonte: Elaborato dell'autore su dati del Joint Reserche Centre (JRC, 2024).

L'International Energy Agency (IEA, 2024) dimostra che l'introduzione dei *Minimum Energy Performance Standards* (MEPS) e dei sistemi di etichettatura ha determinato una dissociazione tra il numero di elettrodomestici installati e i consumi di energia, infatti, nonostante l'aumento costante del numero di dispositivi installati, il consumo totale di elettricità per le lavastoviglie in UE è diminuito da 25 TWh a 18 TWh nel trentennio 1990-2020 (**Figura 11**). Questa riduzione dei consumi riesce a contenere i picchi di domanda energetica che gravano sulle reti urbane, facilitando l'integrazione degli edifici all'interno delle *Smart Grid*.

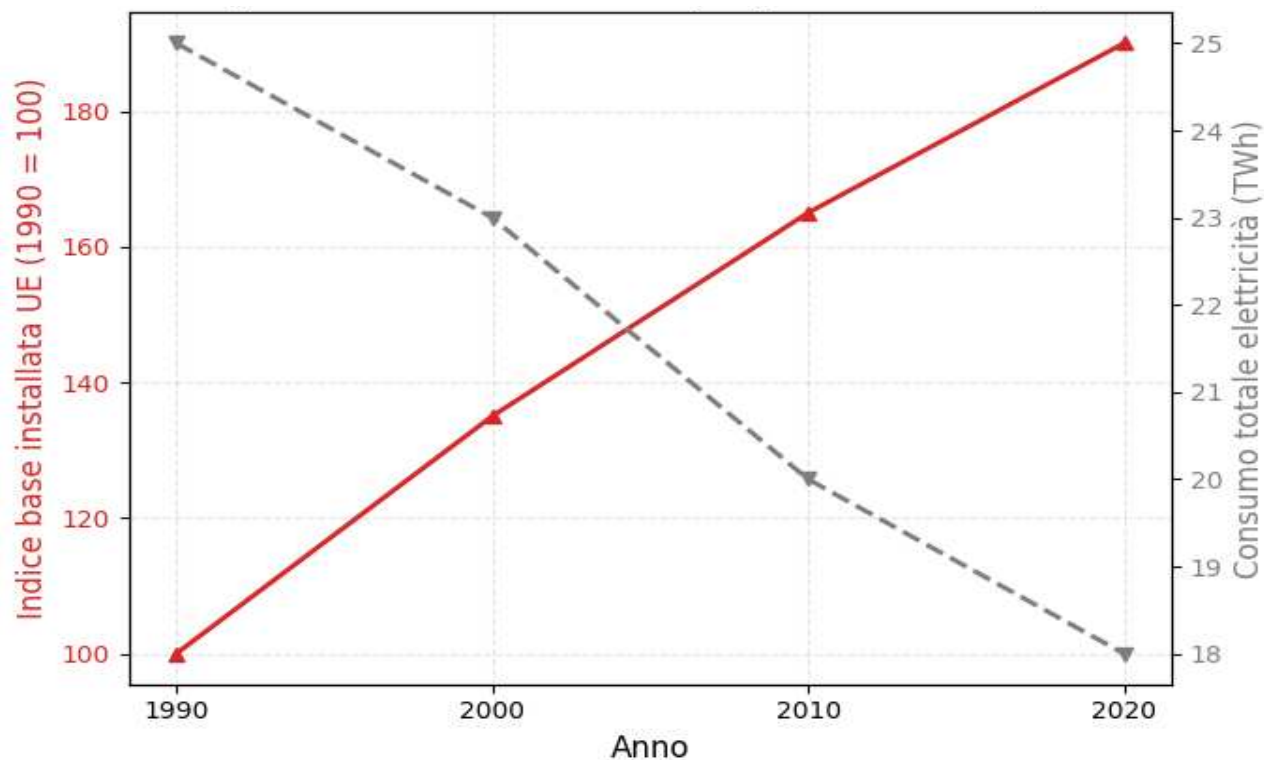


Figura 11 - Consumo totale elettricità lavastoviglie 1990-2020. Fonte: Elaborato dell'autore su International Energy Agency (IEA, 2024)

La legislazione Europea ha avuto un ruolo determinante in questo processo. L'accumulo di prodotti al vertice delle vecchie scale energetiche (A+, A++, A+++) aveva ormai saturato il mercato, rendendo l'etichetta inefficace come spinta innovativa (ENEA, 2021). Il meccanismo di *rescaling* introdotto nel marzo 2021 (Regolamenti UE 2019/2022 e 2019/2017) ha ripristinato la severità della scala da A a G, modificando anche la metodologia di calcolo, passando da una stima annuale a una misurazione rigorosa su 100 cicli.

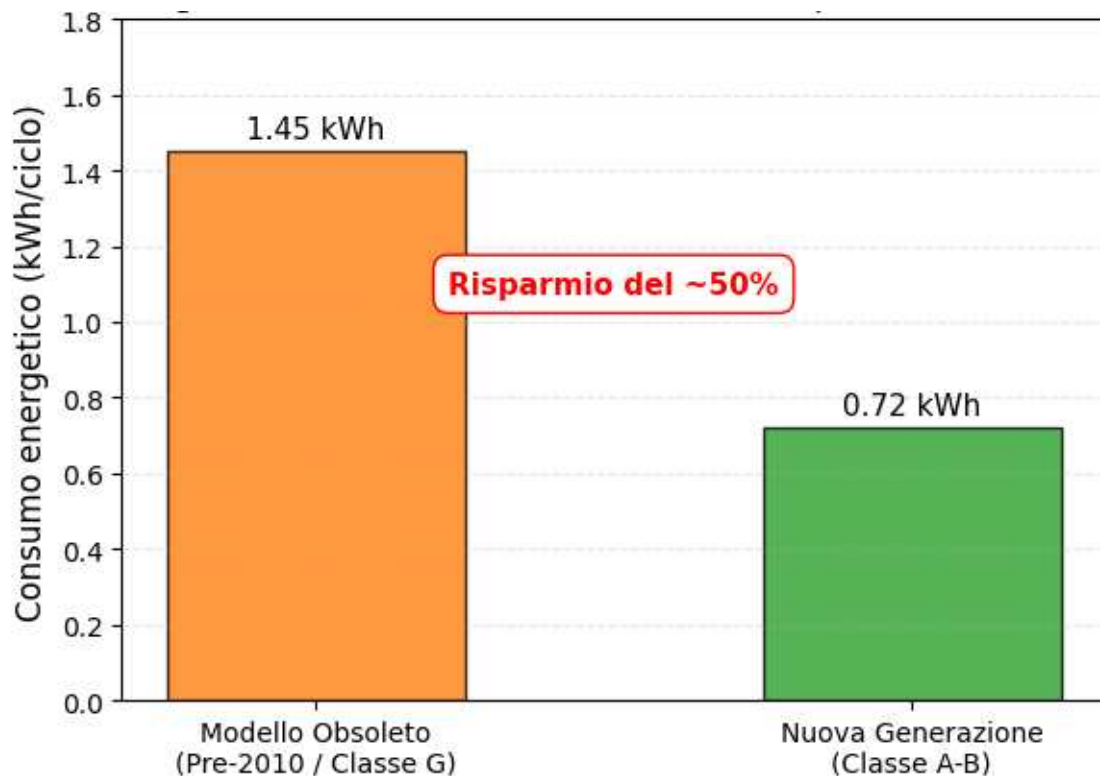


Figura 12 - Confronto consumo medio per ciclo tra Modello Obsoleto e Nuova Generazione. Come evidenziato nella figura, la sostituzione di un apparecchio obsoleto con un modello di nuova generazione (classe A o B) garantisce oggi una riduzione dei consumi elettrici fino al 50%. Fonte: Elaborato dell'autore su dati ENEA.

Tuttavia, avendo raggiunto i limiti asintotici dell'ottimizzazione puramente meccanica (approccio *Product-Centered*), l'industria ha dovuto spostare la ricerca verso un approccio *User-Centered Eco-Design*, integrando obiettivi di sostenibilità ambientale e abitudini dei consumatori (Dekoninck & Elias, 2011). L'efficienza complessiva reale, infatti, non dipende più solo dalla progettazione ingegneristica, ma dall'interazione tra la macchina e la modalità con cui essa viene utilizzata, rendendo necessarie nuove soluzioni tecnologiche in grado di guidare, adattare e ottimizzare ogni singolo ciclo di lavaggio.

3.2 Tecnologie di ottimizzazione: sensori di carico, programmi eco e recupero del calore

L'evoluzione delle lavastoviglie moderne non è stata determinata esclusivamente dal miglioramento della meccanica o idraulica, ma soprattutto dall'integrazione di sistemi di controllo intelligenti capaci di adattare e regolare il ciclo alle condizioni operative reali. Una valutazione complessiva del ciclo di vita di questi dispositivi evidenzia come la progettazione debba rispondere a precisi criteri termodinamici e fluidodinamici per soddisfare i limiti di produzione e consumo sostenibili (Venkatesh, 2022).

In questo contesto, il funzionamento dei programmi adattivi, comunemente denominati "Auto", si basa sull'integrazione di sistemi di controllo a feedback in tempo reale che superano la rigidità dei cicli temporizzati classici attraverso la quantificazione analitica del carico inquinante istantaneo. Questa tecnologia si affida a sensori ottici di torbidità (turbidity sensors) e dispositivi di rilevamento della massa (load sensors) inseriti all'interno della macchina, i quali comunicano costantemente con la centralina elettronica per modificare dinamicamente durante il funzionamento la durata del ciclo, il volume d'acqua e la temperatura di esercizio.

Secondo il Joint Research Centre della Commissione Europea (JRC, 2023), l'utilizzo di queste logiche di rilevamento automatico consente riduzioni dei consumi energetici comprese tra il 10% e il 20% rispetto ai programmi tradizionali a parametri fissi.

Dal punto di vista fisico, il sensore di torbidità rileva il livello di sporco dell'acqua misurando la variazione dell'intensità di un fascio luminoso nel campo dell'infrarosso vicino (NIR, con lunghezza d'onda $\lambda \approx 850\text{--}950\text{ nm}$) durante il suo attraversamento all'interno del fluido contenente residui organici e sospensioni.

Questa riduzione di intensità è dovuta alla combinazione dei fenomeni di assorbimento e diffusione della radiazione da parte delle particelle sospese nel fluido. Questi fenomeni sono chiamati assorbimento molecolare e scattering non isotropo (teoria di Mie). Questo comportamento può essere descritto, in una prima approssimazione, tramite una formulazione analoga alla legge di Beer-Lambert:

$$I(L) = I_0 \cdot e^{(-\alpha \cdot C \cdot L)}$$

dove:

- I_0 = intensità luminosa incidente emessa dal LED
- $I(L)$ = intensità luminosa residua rilevata dal fotodetettore
- C = concentrazione delle particelle sospese
- α = coefficiente di estinzione specifico
- L = lunghezza del percorso ottico

Il fototransistor traduce l'intensità luminosa in un segnale analogico di tensione V_{out} , linearizzato in funzione delle unità di torbidità nefelometriche (NTU) tramite la relazione empirica:

$$V_{out} = k_1 \cdot \ln(NTU) + k_2$$

Il sistema di controllo integrato campiona questo segnale valutandone la derivata prima rispetto al tempo, ottenendo un'indicazione quantitativa sulla velocità di distacco dello sporco.

Qualora il fluido mostri una bassa opacità stazionaria, la logica fuzzy, ovvero la logica che non ragiona soltanto in termini binari (Sì/No) ma introduce dei livelli intermedi (Fuzzy Logic Control), interviene modificando in tempo reale la matrice operativa del ciclo interfacciandosi direttamente con i sensori di carico per stimare la massa complessiva delle stoviglie.

Poiché il riscaldamento dell'acqua rappresenta circa il 70–80% dell'energia complessivamente assorbita da una lavastoviglie domestica, l'energia termica Q richiesta per portare il fluido alla temperatura di esercizio risponde alla legge della calorimetria:

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T$$

dove:

- Q = energia termica richiesta (J);

- m = massa dell'acqua (kg);
- c_p = calore specifico dell'acqua (circa $4,18 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$);
- ΔT = differenza tra temperatura iniziale e temperatura finale (K);
-

Andando a modificare il volume d'acqua in funzione del carico e riducendo anche di pochi gradi il salto termico ΔT , il sistema genera un risparmio energetico lineare senza compromettere l'efficienza idraulica.

Parallelamente ai sistemi adattivi Auto, i programmi "Eco" sono diventati il riferimento normativo per la determinazione delle prestazioni energetiche dichiarate nelle etichette europee.

Il loro principio operativo si basa sulla riduzione della temperatura dell'acqua, generalmente compresa tra 45 e $50 \text{ }^\circ\text{C}$, e sulla rimodulazione del "Cerchio di Sinner", ovvero l'equilibrio tra azione chimica, azione meccanica, temperatura e tempo di contatto.

In accordo con la legge di Arrhenius, la riduzione della temperatura rallenta la cinetica di dissoluzione e saponificazione dei grassi. Per compensare questo deficit, i programmi ecologici estendono il tempo di esposizione e ottimizzano i vettori fluidodinamici dei bracci irroratori.

Questa transizione verso cicli prolungati a bassa temperatura permette riduzioni dei consumi operativi superiori al 40% rispetto alle configurazioni tradizionali (Venkatesh, 2022).

L'ultimo punto sull'efficientamento strutturale risiede nella mitigazione delle dispersioni e nel recupero del calore dalle acque reflue.

L'implementazione di scambiatori di calore a flussi incrociati o in controcorrente consente di pre-riscaldare l'acqua fredda in ingresso sfruttando l'energia termica del fluido di scarico.

L'efficienza termica dello scambiatore ε viene definita come:

$$\varepsilon = (T_{c,out} - T_{c,in}) / (T_{h,in} - T_{c,in})$$

dove:

- ε = efficienza termica dello scambiatore
- $T_{c,out}$ = temperatura del fluido freddo in uscita (K);
- $T_{c,in}$ = temperatura del fluido freddo in ingresso (K);
- $T_{h,in}$ = temperatura del fluido caldo in ingresso (K);

Il mantenimento di un elevato gradiente termico nella configurazione controcorrente riduce il lavoro richiesto alle resistenze elettriche principali.

Questa integrazione sinergica tra sensoristica avanzata, algoritmi di controllo e recupero energetico dimostra come la lavastoviglie si sia trasformata da semplice elettrodomestico a sistema intelligente, stando in linea con le attuali direttive europee di sostenibilità.

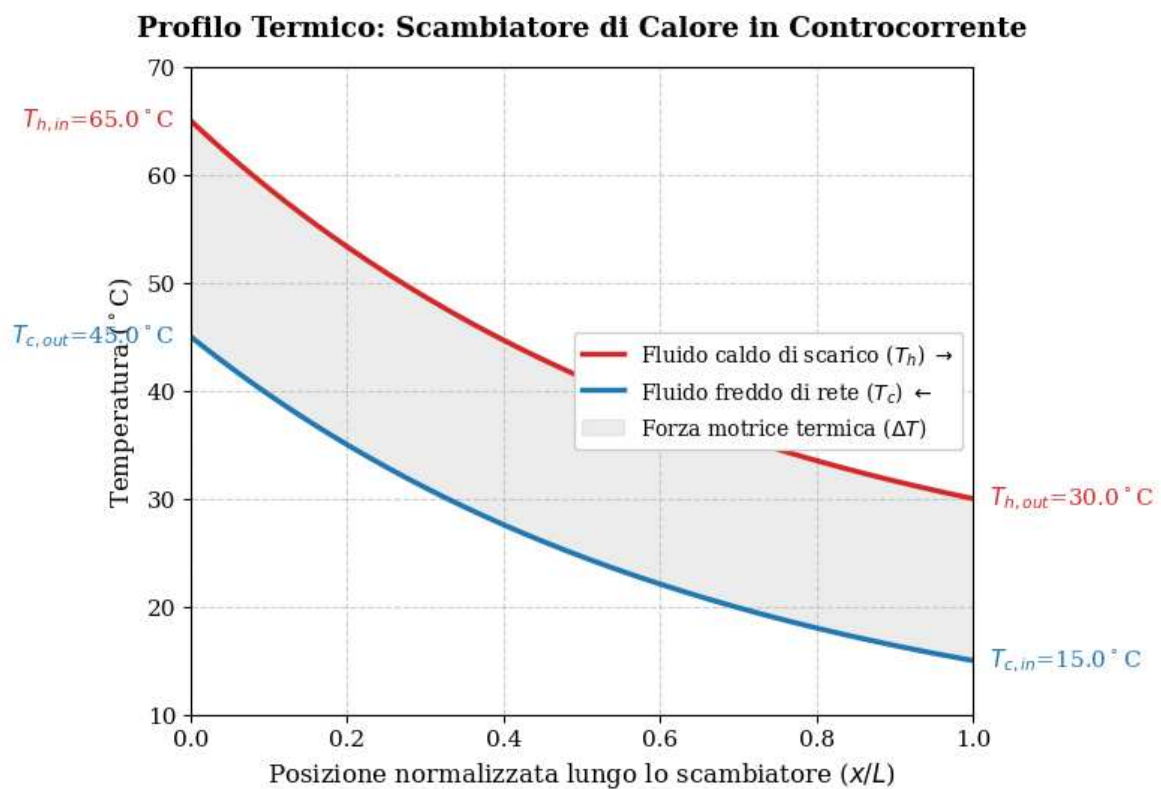


Figura 13 - Profilo termico scambiatore di calore controcorrente. Fonte: Elaborato dell'autore.

3.3 La tecnologia Zeolite per l'asciugatura

Un'importante innovazione tecnologica nelle lavastoviglie è stata l'introduzione di sistemi di asciugatura tramite Zeolite, che ha permesso di ottenere un miglioramento dell'efficienza termodinamica rilevante. Sviluppata inizialmente per il mercato domestico di alta gamma, questa tecnologia sfrutta le proprietà chimico-fisiche degli alluminosilicati cristallini, minerali caratterizzati da una struttura altamente microporosa ed elevata superficie specifica interna, capaci di intrappolare reversibilmente le molecole d'acqua.

Il principio di funzionamento si basa sull'adsorbimento fisico, un processo termodinamicamente esotermico in cui il vapore acqueo viene catturato e trattenuto dalla struttura microporosa della Zeolite. Durante questo fenomeno il calore latente associato al vapore e l'energia di interazione tra adsorbato e adsorbente vengono convertiti in calore sensibile, il quale viene successivamente recuperato per aumentare l'efficienza della fase di asciugatura. (Hauer & Fischer, 2011). A livello pratico e progettuale, i granuli di zeolite sono collocati in un contenitore integrato nel circuito d'aria della macchina. Durante la fase di asciugatura, l'aria satura di umidità presente nella vasca viene convogliata forzatamente attraverso questo serbatoio: a contatto con il minerale, l'umidità viene rapidamente adsorbita e l'aria, deumidificata e surriscaldata dall'energia sprigionata dalla reazione, viene reimmessa nella camera di lavaggio, accelerando l'evaporazione dell'acqua residua sulle stoviglie senza ricorrere al riscaldamento elettrico attivo delle resistenze (Bengtsson, 2016).

Un aspetto ingegneristico di grande sostenibilità risiede nella totale reversibilità del processo. La zeolite, infatti, non viene consumata durante l'esercizio: nel ciclo di lavaggio successivo, il calore generato per portare in temperatura l'acqua di lavaggio viene sfruttato per riscaldare il minerale a temperature di desorbimento, forzando il rilascio dell'umidità stoccata e rigenerando la capacità adsorbente del materiale per il ciclo di asciugatura successivo (Santori et al., 2013). Oltre al risparmio energetico — che, come indicato in letteratura, può ridurre il consumo totale del ciclo di oltre il 20-24% (Hauer & Fischer, 2011) — questa tecnologia è particolarmente efficace nel trattare stoviglie in materiali plastici, i quali sono caratterizzati da una bassa capacità termica e ridotta conducibilità. Essi traggono beneficio diretto dal flusso d'aria calda e secca generato, che permette di ottenere risultati di

asciugatura uniformi laddove i sistemi a condensazione convenzionali risultano meno performanti.

La ricerca attuale sta estendendo il campo di studio verso dessiccanti a diversa idrofilia, quali il gel di silice microporoso o la zeolite SAPO-34, con l'obiettivo di abbassare le temperature di rigenerazione richieste e ottimizzare ulteriormente il bilancio energetico globale dell'elettrodomestico (Frazzica et al., 2019). Questa conversione diretta dell'umidità in calore, minimizza l'impronta energetica primaria e azzerla la dispersione di aria calda e umida nell'ambiente domestico, definendo un netto salto di qualità rispetto alle metodologie tradizionali di evaporazione assistita.

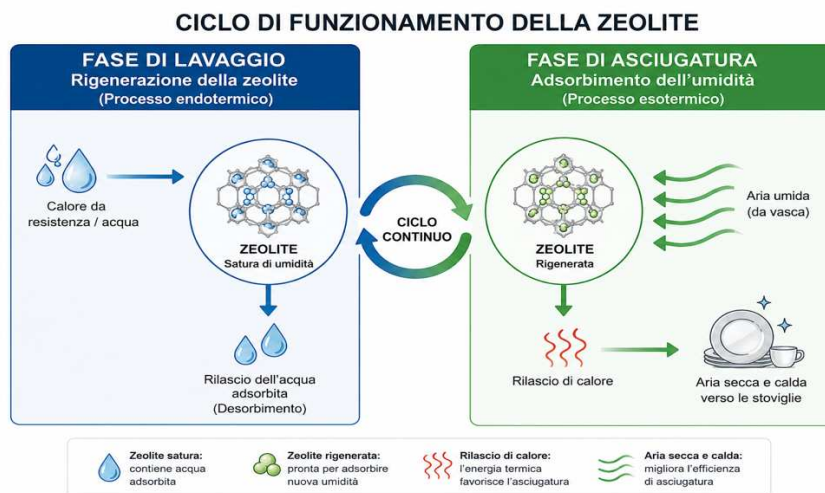


Figura 14 - Schema funzionale del ciclo rigenerativo della zeolite. A destra: Fase di asciugatura (adsorbimento). Fonte: Elaborato dell'autore.

L'aria satura di umidità circola attraverso il letto di zeolite; il processo esotermico riscalda il flusso d'aria, che viene reimmesso in vasca per un'asciugatura efficiente. A sinistra: Fase di lavaggio (rigenerazione). Il calore fornito dal riscaldamento dell'acqua nel ciclo successivo desorbe le molecole d'acqua dalla zeolite, ripristinando la capacità del materiale per il ciclo di asciugatura successivo (Adattato da Hauer & Fischer, 2011).

3.4 Benefici energetici e ambientali

L'evoluzione ingegneristica e tecnologica delle lavastoviglie ha trasformato radicalmente l'impatto ambientale di questi dispositivi. L'analisi del ciclo di vita (LCA) evidenzia che oltre l'80% dell'energia consumata durante la vita utile dell'elettrodomestico è attribuibile alla fase d'uso, a causa dei carichi termici necessari per il riscaldamento dell'acqua (Pérez-Foguet et al., 2018). Grazie all'integrazione di sensori di carico e torbidità, programmi "Eco", programmi adattivi "Auto", tecnologie come lo scambio termico a flussi incrociati e l'asciugatura ad adsorbimento con Zeolite, è stato possibile raggiungere una riduzione dei consumi energetici superiori al 40% (Venkatesh, 2022).

Secondo i dati del Joint Research Centre (JRC, 2024), una moderna lavastoviglie europea consuma mediamente meno della metà dell'energia rispetto ai modelli prodotti negli anni Novanta, con fabbisogni idrici scesi da circa 30 litri a valori inferiori a 10 litri per ciclo (con punte di 7 litri nei modelli top di gamma). Questi dati risultano particolarmente vantaggiosi se confrontati con il lavaggio manuale, che può richiedere tra i 35 e gli 80 litri d'acqua per un carico equivalente, confermando la superiorità dell'elettrodomestico in termini di efficienza delle risorse (Stamminger, 2011).

Dal punto di vista della sostenibilità globale, la riduzione del fabbisogno elettrico comporta una riduzione indiretta delle emissioni di gas serra, beneficiando direttamente della progressiva decarbonizzazione del mix energetico europeo. Ulteriori vantaggi derivano dall'integrazione IoT, che abilita la gestione intelligente della domanda (Demand Side Management), permettendo di programmare il funzionamento nelle fasce orarie a minor costo o a maggiore disponibilità di energia rinnovabile.

Infine, l'approccio orientato al ciclo di vita e quindi alla sostenibilità non si limita alla fase operativa. In linea con le normative europee di *Ecodesign*, la progettazione pone l'attenzione anche sulla durabilità e sulla riparabilità del prodotto. L'allungamento della vita utile permette di diluire l'energia "incorporata" (embodied energy) nella fase di produzione su un arco temporale più esteso, riducendo l'impronta carbonica complessiva del dispositivo. In sintesi, il progresso tecnologico del decennio 2015–2025 dimostra che l'ottimizzazione delle performance non è stata perseguita a discapito dell'efficacia di lavaggio, bensì attraverso

un'architettura di sistema capace di unire rigore termodinamico e responsabilità ambientale (Frazzica et al., 2019).

CAPITOLO 4

4.1 Panoramica dei sistemi di cottura domestici e confronto tecnologico

I sistemi di cottura domestici costituiscono una componente rilevante dei consumi energetici residenziali e rappresentano uno dei settori più interessati dai recenti processi di innovazione tecnologica ed efficientamento energetico. L'evoluzione di questo settore è stata guidata sia dall'esigenza di migliorare le prestazioni degli apparecchi sia dalle politiche europee finalizzate alla riduzione dei consumi energetici e delle emissioni associate all'uso finale dell'energia. Tale processo è stato sostenuto dal Regolamento Delegato (UE) n. 65/2014 relativo all'etichettatura energetica di forni e cappe domestiche e dal Regolamento (UE) n. 66/2014 che stabilisce i requisiti di ecodesign per forni, piani cottura e cappe aspiranti.

Nell'ambito domestico, i principali sistemi coinvolti nella preparazione degli alimenti, quindi coinvolti nell'utilizzo quotidiano, comprendono i piani cottura, i forni e le cappe aspiranti. Sebbene questi elettrodomestici svolgano funzioni differenti, il loro sviluppo tecnologico è stato caratterizzato da un progressivo incremento dell'efficienza energetica, dall'integrazione di sistemi elettronici di controllo e dall'adozione di soluzioni progettuali finalizzate alla riduzione delle dispersioni energetiche.

Nella moderna progettazione di edifici ad altissime prestazioni energetiche, come gli “NZEB” (Nearly Zero-Energy Buildings) o gli edifici realizzati secondo lo standard “Passivhaus” (casa passiva), l'ambiente cucina viene considerato come un sottosistema integrato all'interno del sistema edificio-impianto. La significativa riduzione delle dispersioni termiche dell'involucro edilizio ha infatti concentrato l'attenzione sull'importanza relativa ai carichi termici interni e alla qualità dell'aria indoor (Indoor Air Quality - IAQ), rendendo sempre più rilevante il contributo energetico e ambientale degli elettrodomestici destinati alla preparazione degli alimenti.

Dal punto di vista della fisica tecnica, l'efficienza energetica di un sistema di cottura può essere espressa mediante il rendimento energetico di primo principio, definito come il rapporto tra la potenza termica utile trasferita all'alimento e la potenza assorbita dal sistema:

$$\eta = \dot{Q}_{utile} / P_{in}$$

dove η rappresenta il rendimento energetico, $\dot{Q}_{utile}$ la potenza effettivamente trasferita all'alimento e P_{in} la potenza fornita al sistema.

L'aliquota energetica che non viene convertita in calore utile viene dissipata nell'ambiente circostante e contribuisce all'aumento dei carichi termici interni, con possibili ripercussioni sui fabbisogni di raffrescamento degli edifici durante la stagione estiva.

Per quanto riguarda i piani cottura, le tecnologie maggiormente diffuse sono quelle alimentate a gas, elettriche radianti e a induzione. I piani a gas producono energia termica mediante la combustione del combustibile e trasferiscono il calore ai recipienti principalmente attraverso fenomeni di convezione e irraggiamento. Una parte significativa dell'energia generata viene tuttavia dispersa nell'ambiente, determinando rendimenti energetici generalmente compresi tra il 40% e il 55%, valori molto inferiori rispetto alle recenti tecnologie elettriche (European Commission, Energy Efficient Products Portal).

Oltre alle dispersioni energetiche, la combustione del gas determina l'emissione nell'ambiente domestico di biossido di azoto (NO_2), monossido di carbonio (CO) e particolato ultrafine, con potenziali effetti negativi sulla qualità dell'aria interna. Tale aspetto assume particolare rilevanza negli edifici caratterizzati da elevata tenuta all'aria e bassi tassi di ventilazione naturale.

I piani elettrici radianti, comunemente identificati come vetroceramici, sfruttano invece l'effetto Joule per convertire l'energia elettrica in energia termica mediante resistenze poste sotto una superficie in vetroceramica, generalmente avente uno spessore di 4 mm. In questo caso il trasferimento del calore avviene dalla resistenza al piano e successivamente al recipiente per conduzione e irraggiamento. I rendimenti risultano generalmente compresi tra

il 60% e il 70%, ma tali apparecchi presentano una significativa inerzia termica e tempi di risposta relativamente elevati durante le variazioni di potenza.

La tecnologia a induzione rappresenta attualmente una delle soluzioni più avanzate disponibili nel settore della cottura domestica. Il suo funzionamento si basa sul principio dell'induzione elettromagnetica descritto dalla legge di Faraday-Neumann-Lenz. Una bobina percorsa da corrente alternata ad alta frequenza genera un campo magnetico variabile che induce correnti parassite nel fondo del recipiente. L'interazione tra tali correnti e la resistenza elettrica del materiale produce calore direttamente all'interno della pentola, eliminando la necessità di una superficie riscaldante intermedia.

Dal punto di vista fisico, la profondità di penetrazione delle correnti indotte può essere descritta mediante la relazione:

$$\delta = \sqrt{\rho / (\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu_r)}$$

dove ρ rappresenta la resistività elettrica del materiale, f la frequenza operativa, μ_0 la permeabilità magnetica del vuoto e μ_r la permeabilità magnetica relativa del recipiente.

Questo meccanismo consente di ottenere rendimenti energetici generalmente compresi tra l'85% e il 90%, riducendo sensibilmente le dispersioni termiche e garantendo un controllo molto preciso della potenza erogata (Joint Research Centre, 2022).

L'evoluzione tecnologica ha interessato in maniera significativa anche i forni domestici. Dal punto di vista termodinamico, il processo di cottura avviene mediante una combinazione di conduzione, convezione e irraggiamento. Il bilancio energetico semplificato può essere espresso come:

$$P_{in} = \dot{Q}_{utile} + \dot{Q}_{pareti} + \dot{Q}_{aria} + \dot{Q}_{perdite}$$

dove $\dot{Q}_{pareti}$ rappresenta il flusso termico disperso attraverso le pareti del forno, $\dot{Q}_{aria}$ il contributo associato al riscaldamento dell'aria interna e $\dot{Q}_{perdite}$ le ulteriori dispersioni energetiche.

Nei forni statici il calore viene distribuito soltanto attraverso moti convettivi naturali e scambi radiativi tra le superfici interne della cavità, mentre nei forni ventilati e multifunzione una ventola forza la circolazione dell'aria incrementando il coefficiente di scambio termico convettivo e migliorando l'uniformità della temperatura.

Questo fenomeno è descritto dalla legge di Newton per la convezione:

$$\dot{Q} = h \cdot A \cdot \Delta T$$

dove h rappresenta il coefficiente di scambio termico convettivo, A la superficie di scambio e ΔT la differenza di temperatura tra superficie e fluido.

I moderni forni multifunzione riescono ad integrare modalità di cottura statica, ventilata, grill e programmi automatici gestiti da sistemi elettronici avanzati e Intelligenza Artificiale. L'utilizzo di sensori di temperatura e algoritmi di regolazione consente di ottimizzare il processo di cottura e ridurre i consumi energetici rispetto alle generazioni precedenti di apparecchi.

Accanto ai sistemi di cottura, un ruolo fondamentale è svolto dalle cappe aspiranti, il cui compito consiste nella rimozione di vapori, odori, aerosol grassi e prodotti della combustione generati durante la preparazione degli alimenti tramite i sistemi di cottura, motivo per cui molto spesso, le cappe moderne ed i piani cottura “comunicano” tra di loro attraverso dei sistemi intelligenti integrati.

Dal punto di vista impiantistico, tali apparecchi possono essere assimilati a sistemi di ventilazione localizzata che operano attraverso ventilatori in grado di generare una depressione sufficiente a captare gli inquinanti direttamente in prossimità della sorgente.

Le prestazioni delle cappe dipendono principalmente dalla portata d'aria movimentata (m^3/h), dalla prevalenza disponibile e dall'efficienza fluidodinamica del sistema. Le normative europee introducono specifici indicatori prestazionali come il consumo energetico annuo (AEC), l'efficienza fluidodinamica (FDE), l'efficienza di filtrazione dei grassi e l'efficienza luminosa (Regolamento Delegato UE n. 65/2014).

Nel caso delle cappe ad espulsione verso l'esterno, la perdita di energia associata al rinnovo dell'aria può essere stimata mediante la relazione:

$$\dot{H}_{disp} = \dot{V} \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_{int} - T_{est})$$

dove $\dot{V}$ rappresenta la portata d'aria estratta, ρ la densità dell'aria, c_p il calore specifico dell'aria, T_{int} la temperatura interna e T_{est} la temperatura esterna.

Negli edifici ad elevata tenuta all'aria, queste dispersioni possono influenzare negativamente il bilancio energetico complessivo dell'edificio. Per questo motivo, nelle costruzioni di nuova generazione si denota una crescente diffusione delle cappe filtranti ad alta efficienza, che consentono di preservare l'equilibrio dei flussi d'aria interni e di integrarsi efficacemente con sistemi di ventilazione meccanica controllata.

L'analisi delle diverse tecnologie evidenzia come il settore della cottura domestica stia progressivamente convergendo verso soluzioni ad elevata efficienza energetica e ad elevato livello di integrazione elettronica. In particolare, la diffusione dei piani a induzione, dei forni multifunzione e delle cappe ad alte prestazioni si inserisce nel più ampio processo di elettrificazione dei consumi finali e di decarbonizzazione del settore residenziale promosso dalle politiche energetiche europee. Questi elettrodomestici, insieme ai già citati frigoriferi e lavastoviglie, rappresentano oggi uno degli strumenti più efficaci per migliorare le prestazioni energetiche delle abitazioni senza compromettere comfort, sicurezza e qualità delle prestazioni di cottura.

4.2 Piani ad induzione: principi fisici, componenti ed efficienza

L'induzione rappresenta una delle tecnologie più avanzate settore della cottura domestica, poiché combina elevata efficienza energetica, rapidità di riscaldamento, precisione nel controllo termico e una significativa riduzione delle dispersioni energetiche. La sua diffusione si inserisce nel più ampio processo di elettrificazione dei consumi finali promosso dalle politiche energetiche europee, orientato alla progressiva riduzione dell'impiego di combustibili fossili e all'integrazione con sistemi elettrici alimentati sempre più frequentemente da fonti rinnovabili.

Il miglioramento della resa rispetto ad un piano cottura alimentato a gas deriva dalla modalità con cui l'energia viene trasferita: nei sistemi convenzionali il calore viene generato esternamente al recipiente e successivamente trasferito attraverso fenomeni di conduzione e convezione, mentre nei sistemi a induzione il calore viene prodotto direttamente all'interno del materiale ferromagnetico della pentola.

Una particolare attenzione va posta anche sul tipo di pentole che vengono impiegate nel sistema, poiché non tutti i recipienti presentano la stessa distribuzione di materiale ferromagnetico nel fondo. Quindi per ottenere le massime prestazioni del piano cottura è necessario utilizzare pentole progettate specificamente per questa tecnologia.

Il principio di funzionamento si basa sul fenomeno dell'induzione elettromagnetica descritto dalla legge di Faraday-Neumann-Lenz. Una bobina conduttrice posta al di sotto del piano in vetroceramica viene alimentata da una corrente alternata ad alta frequenza generata da un inverter elettronico di potenza. La corrente circolante nella bobina produce un campo magnetico variabile nel tempo che attraversa il piano e interagisce con il fondo metallico del recipiente.

La relazione fondamentale che descrive il fenomeno dell'induzione elettromagnetica è:

$$\varepsilon = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt}$$

dove:

- ε = forza elettromotrice indotta (V);
- N = numero di spire della bobina;
- Φ = flusso magnetico concatenato (Wb);
- $d\Phi/dt$ = variazione del flusso magnetico nel tempo.

Il campo magnetico alternato, generalmente compreso nell'intervallo 20–50 kHz, induce nel materiale ferromagnetico del recipiente delle correnti elettriche circolanti definite correnti parassite, chiamate “Eddy Currents” o “Correnti di Foucault”. Queste correnti generano calore attraverso l'effetto Joule, fenomeno fisico che descrive come un materiale attraversato

da corrente elettrica trasforma parte di essa in calore, determinando il riscaldamento diretto del recipiente.

La potenza dissipata per effetto Joule può essere descritta mediante la relazione:

$$P_j = \int V \rho \cdot J^2 dV$$

dove:

- P_j = potenza dissipata per effetto Joule;
- ρ = resistività elettrica del materiale;
- J = densità di corrente indotta;
- V = volume del materiale coinvolto.

Nei materiali ferromagnetici si aggiunge inoltre il contributo delle perdite per isteresi magnetica, dovute alla continua variazione del ciclo di magnetizzazione del materiale sottoposto al campo alternato.

Tale contributo può essere espresso come:

$$PH = f \cdot \oint H dB$$

dove:

- PH = potenza dissipata per isteresi magnetica;
- f = frequenza del campo magnetico;
- H = intensità del campo magnetico;
- B = induzione magnetica.

La combinazione tra effetto Joule e isteresi magnetica permette quindi di trasformare direttamente l'energia elettrica in energia termica all'interno del recipiente, riducendo drasticamente le perdite tipiche dei sistemi a fiamma o a resistenza elettrica (Choudhury et al., 2021; Luo et al., 2020).

Dal punto di vista energetico, il rendimento del sistema può essere definito come il rapporto tra l'energia utile trasferita al processo di cottura e l'energia elettrica assorbita:

$$\eta = Q_{utile} / E_{assorbita}$$

dove:

- η = rendimento energetico;
- Q_{utile} = energia effettivamente trasferita al contenuto della pentola;
- $E_{assorbita}$ = energia elettrica fornita al sistema.

L'elevato rendimento raggiungibile dai piani a induzione dipende dalla progettazione della bobina, dalle caratteristiche magnetiche del materiale del recipiente e dalla capacità dell'elettronica di controllo di modulare il campo elettromagnetico in funzione delle condizioni operative.

Uno dei componenti fondamentali del sistema è rappresentato dall'inverter elettronico, generalmente realizzato mediante dispositivi semiconduttori di potenza come gli IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor). La sua funzione è quella di convertire la corrente continua proveniente dalla rete elettrica in una corrente alternata ad alta frequenza, regolando in modo dinamico la potenza trasferita alla bobina.

La regolazione della frequenza e dei parametri elettrici permette di controllare con precisione la quantità di energia fornita, garantendo:

- rapidità di riscaldamento;
- stabilità della temperatura;
- riduzione dei fenomeni di surriscaldamento;
- maggiore efficienza complessiva.

L'evoluzione tecnologica ha portato allo sviluppo di sistemi multi-zona come la tecnologia "Flex Zone", basata sulla gestione coordinata di più bobine indipendenti. Tale soluzione consente di adattare automaticamente il campo magnetico alla posizione e alla dimensione del recipiente, migliorando l'uniformità del riscaldamento e limitando le dispersioni

energetiche. Un'ulteriore evoluzione è rappresentata dal sistema "Full-Induction", nei quali l'intera superficie del piano cottura è interamente coperta da una fitta rete bobine indipendenti. Nei modelli di maggiori dimensioni si superano le 50 unità di elementi attivi, potendo gestire più recipienti in completa libertà su tutta la superficie, interagendo anche con i sistemi di controllo ed intelligenza artificiale per ottimizzare potenza e consumi.

Parallelamente, la funzione "Power Management" permette di limitare la potenza massima assorbita dal piano cottura in funzione della disponibilità della rete domestica. I sistemi moderni possono modulare la potenza operativa, generalmente compresa tra circa 1 kW e 7,4 kW, evitando sovraccarichi e migliorando la gestione della domanda elettrica.

I piani a induzione di ultima generazione integrano inoltre sistemi avanzati di sensoristica e controllo automatico, tra cui:

- sensori di temperatura;
- sensori di corrente;
- sistemi di riconoscimento automatico del recipiente;
- algoritmi predittivi di regolazione.

Questi dispositivi consentono un funzionamento in retroazione continua, nel quale il sistema rileva le condizioni operative e modifica automaticamente la potenza erogata per mantenere il processo nelle condizioni ottimali (Deng et al., 2022).

Il principio di controllo può essere rappresentato attraverso uno schema a feedback:

“Parametro rilevato → Elaborazione elettronica → Regolazione della potenza → Nuova condizione operativa”.

Questo approccio permette di minimizzare gli sprechi energetici dovuti a condizioni di funzionamento non ottimali e di migliorare sicurezza e affidabilità del dispositivo.

Un'ulteriore evoluzione è rappresentata dall'integrazione dei sistemi a induzione con tecnologie IoT (Internet of Things). La comunicazione tra piano cottura, cappe aspiranti

intelligenti e sistemi di gestione domestica consente di coordinare automaticamente aspirazione, temperatura e modalità operative.

Le cappe intelligenti possono infatti modificare il flusso d'aria in funzione dei parametri rilevati durante la cottura, come ad esempio la tipologia di fumo, migliorando la qualità dell'ambiente interno e riducendo consumi energetici non necessari.

Nel complesso, il piano a induzione costituisce un esempio di sistema meccatronico integrato in cui elettromagnetismo, elettronica di potenza, sensoristica e controllo automatico convergono per ottimizzare il trasferimento energetico.

L'elevata efficienza, la precisione nella regolazione termica e la compatibilità con la progressiva elettrificazione dei consumi rendono questa tecnologia uno dei principali riferimenti per la progettazione sostenibile degli elettrodomestici domestici moderni.

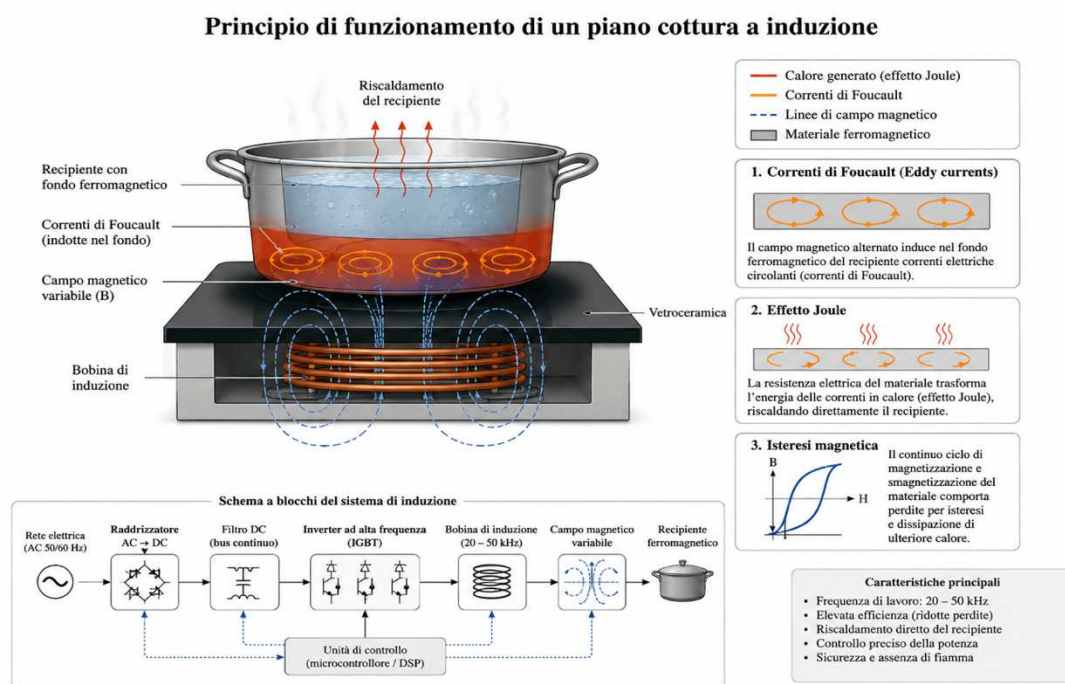


Figura 15 - Rappresentazione schematica dell'induzione elettromagnetica nel piano cottura. *Fonte: Elaborato dell'autore.*

Lo schema illustra il principio di funzionamento: la bobina di induzione eccitata da alta frequenza genera un campo magnetico variabile (B), che induce correnti parassite (correnti di Foucault) nel fondo ferromagnetico del recipiente. Il calore viene generato per effetto

Joule e per isteresi magnetica direttamente nel materiale del recipiente. Adattato da Luo et al. (2020).

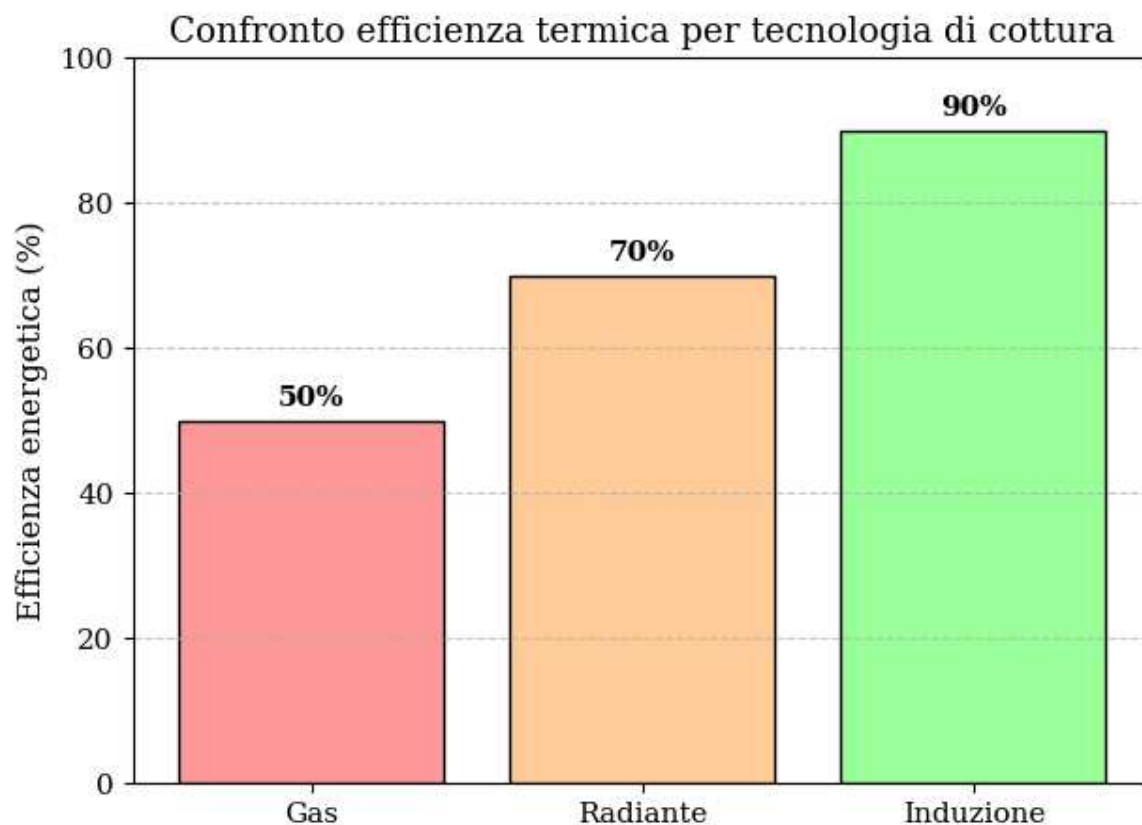


Figura 16 - Confronto dell'efficienza termica tra diverse tecnologie di cottura. L'istogramma evidenzia il rendimento energetico comparato tra piani a gas (ca. 50%), radianti (ca. 70%) e a induzione (ca. 90%). Si osserva come la tecnologia a induzione minimizzi le dispersioni termiche, confermandosi la soluzione più efficiente per il trasferimento energetico in ambito domestico. *Fonte: Elaborato dell'autore su dati JRC (2022).*

4.3 forni domestici: isolamento, ventilazione e controllo elettronico

L'evoluzione tecnologica dei forni domestici nel periodo 2015–2025 è stata caratterizzata da un progressivo miglioramento dell'efficienza energetica ottenuto attraverso l'ottimizzazione dell'isolamento termico, dei sistemi di ventilazione, delle tecnologie di controllo elettronico e dell'integrazione di funzioni operative avanzate.

In un'ottica di sostenibilità ambientale, l'incremento dell'efficienza dei forni permette di ridurre la domanda energetica complessiva degli edifici e, indirettamente, le emissioni associate alla produzione di energia elettrica.

Dal punto di vista fisico, il processo di cottura all'interno di un forno avviene attraverso la combinazione di tre principali meccanismi di trasferimento del calore: conduzione, convezione e irraggiamento. L'efficienza globale del sistema dipende dalla capacità di trasferire la maggiore quantità possibile di energia termica all'alimento, limitando contemporaneamente le dispersioni verso l'ambiente esterno.

Il funzionamento può essere analizzato attraverso il principio di conservazione dell'energia. Il bilancio termico all'interno della cavità di cottura è espresso dalla relazione:

$$Q_{in} - Q_{out} = dU/dt$$

dove:

- Q_{in} = energia termica fornita al sistema;
- Q_{out} = energia dispersa verso l'ambiente esterno;
- dU/dt = variazione dell'energia interna accumulata dal forno e dagli alimenti.

Secondo Bejan (2013), l'efficienza di un sistema termico dipende dalla capacità di ridurre al minimo le irreversibilità associate ai processi di trasferimento energetico. Nel caso dei forni domestici, questo significa ridurre le dispersioni e migliorare il trasferimento del calore dalla sorgente energetica verso il volume utile della camera di cottura.

Uno dei principali interventi progettuali ha riguardato il miglioramento dell'isolamento della cavità interna. Le dispersioni termiche avvengono principalmente attraverso le pareti laterali, il pannello posteriore e la porta del forno. Il flusso termico conduttivo attraverso le superfici può essere descritto mediante la legge di Fourier:

$$Q_{cond} = A \cdot \Delta T / \Sigma R_{th}$$

dove:

- Q_{cond} = flusso termico conduttivo;
- A = area della superficie di scambio;
- ΔT = differenza di temperatura tra interno ed esterno;
- ΣR_{th} = resistenza termica complessiva dell'involucro.

La resistenza termica dell'involucro dipende dalla conducibilità dei materiali utilizzati e dallo spessore degli strati isolanti. L'utilizzo di materiali caratterizzati da bassa conducibilità termica λ , come fibre minerali, lana di roccia e materiali ceramici ad alte prestazioni, permette di ridurre il passaggio del calore verso l'esterno e quindi il consumo necessario al mantenimento della temperatura interna (Holman, 2010).

Questo principio viene utilizzato anche nella progettazione energetica degli edifici: un involucro efficiente riduce gli scambi termici indesiderati tra ambiente controllato e ambiente esterno, migliorando il comfort e riducendo il fabbisogno energetico.

Un'evoluzione significativa riguarda la porta del forno, oggi generalmente costituita da sistemi a triplo o quadruplo vetro, spesso con caratteristiche basso-emissive. La presenza di più strati separati da intercapedini d'aria limita i fenomeni di conduzione e convezione, riducendo il riscaldamento delle superfici esterne e migliorando sia la sicurezza del consumatore sia il contenimento dell'energia termica.

Oltre all'isolamento, un altro aspetto da valutare è quello della ventilazione forzata. Nei forni ventilati una ventola interna genera un moto dell'aria calda che migliora la distribuzione della temperatura nella cavità e incrementa lo scambio termico con gli alimenti. Nei modelli di ultima generazione troviamo la tecnologia 4D Hot-Air, che si basa sull'utilizzo di una

ventola ad alte prestazioni che ruota in entrambi i sensi (orario e antiorario), uniformando il flusso d'aria calda all'interno della cavità del forno, ottenendo una maggiore omogeneità termica.

Il trasferimento convettivo è descritto dalla legge di Newton:

$$q = h \cdot A \cdot (T_{aria} - T_{cibo})$$

dove:

- q = flusso termico convettivo;
- h = coefficiente di scambio termico convettivo;
- A = superficie interessata dallo scambio;
- T_{aria} = temperatura dell'aria nella camera;
- T_{cibo} = temperatura superficiale dell'alimento.

L'aumento del coefficiente di scambio termico h dovuto al moto forzato dell'aria riduce lo spessore dello strato limite termico che si forma vicino alla superficie del cibo. Questo migliora l'uniformità della temperatura e permette di ottenere tempi di cottura ridotti rispetto ai sistemi utilizzati nei forni statici (Kumar et al., 2021).

Dal punto di vista energetico, una migliore distribuzione del calore consente di operare a temperature inferiori e per tempi più brevi, determinando una diminuzione dell'energia complessivamente assorbita dal ciclo.

Un ulteriore sviluppo tecnologico è rappresentato dai forni combinati microonde, nei quali viene integrato un sistema di riscaldamento tradizionale con una sorgente a microonde. Le microonde, generalmente generate alla frequenza di 2,45 GHz, interagiscono con le molecole polari presenti negli alimenti provocandone l'oscillazione e generando calore direttamente all'interno del prodotto. Possiamo ottenere così un'azione combinata tra il riscaldamento convenzionale, basato su convezione ed irraggiamento, e il riscaldamento prodotto dalle microonde, con una forte riduzione dei tempi di cottura di circa il 30-40% rispetto alle modalità tradizionali, oltre ad ottenere anche un risparmio energetico. Nei

programmi combinati, la potenza delle microonde viene limitata a valori minori o uguali a 360 W.

L'efficienza dei moderni forni è ulteriormente incrementata dall'evoluzione dei sistemi elettronici di controllo. Nei modelli più recenti, la regolazione della temperatura non è più affidata esclusivamente a sistemi on-off, ma viene gestita attraverso algoritmi capaci di modulare continuamente la potenza delle resistenze.

I sistemi PID (Proportional-Integral-Derivative) regolano il funzionamento del forno sulla base della differenza tra temperatura impostata e temperatura reale misurata dai sensori.

La legge di controllo PID è:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(t)dt + K_d \cdot \frac{de}{dt}$$

dove:

- $u(t)$ = segnale di controllo;
- $e(t)$ = errore tra temperatura impostata e temperatura misurata;
- K_p = coefficiente proporzionale;
- K_i = coefficiente integrale;
- K_d = coefficiente derivativo.

Questa strategia permette di ridurre le oscillazioni termiche rispetto ai termostati tradizionali, evitando inutili cicli di accensione e spegnimento delle resistenze e migliorando il rendimento energetico complessivo (Pérez-Foguet et al., 2018).

I sistemi più avanzati integrano inoltre sensori multipli di temperatura, sonde inserite direttamente nell'alimento e algoritmi predittivi. In questo modo il forno opera come un sistema a circuito chiuso, basato sulle condizioni reali raggiunte dal prodotto e non solamente sulla temperatura dell'aria interna.

La presenza di sonde al cuore dell’alimento consente di interrompere automaticamente la cottura al raggiungimento della temperatura desiderata, evitando consumi aggiuntivi e migliorando la qualità del risultato finale (JRC, 2024).

La connettività IoT rappresenta una delle più recenti evoluzioni del settore. Attraverso sistemi collegati in rete, l’utente può controllare il forno da remoto, monitorare i consumi e utilizzare programmi di cottura ottimizzati. Sebbene il contributo diretto alla riduzione dei consumi sia limitato, queste funzioni favoriscono un utilizzo più consapevole dell’apparecchio.

L’integrazione tra isolamento avanzato, ventilazione ottimizzata, sistemi di controllo elettronico e gestione intelligente dei cicli ha trasformato il forno domestico in un sistema energeticamente più efficiente, capace di coniugare prestazioni elevate, riduzione dei consumi e sostenibilità ambientale.

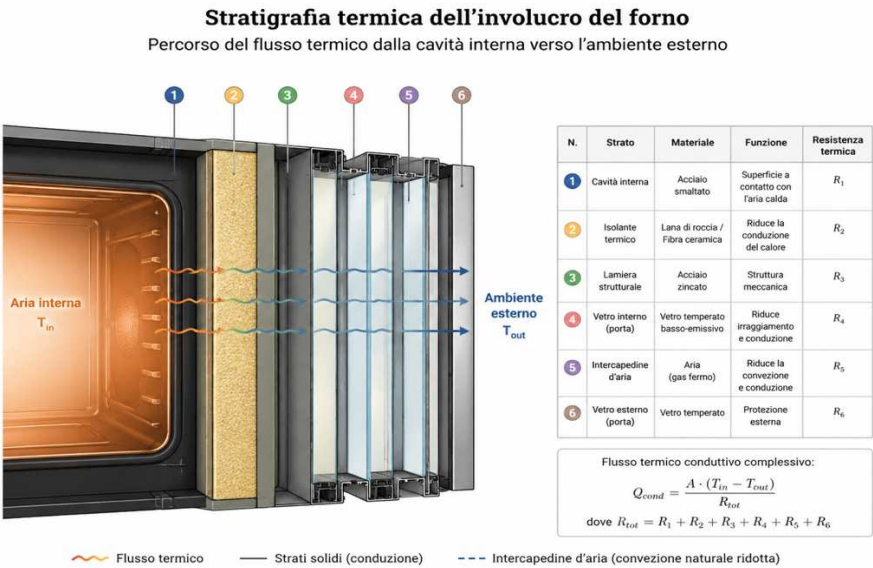


Figura 17 - Stratigrafia dell’involucro del forno domestico e rappresentazione del flusso termico conduttivo secondo la legge di Fourier attraverso i diversi strati resistivi. Fonte: Elaborato dell’autore.

Schema di controllo PID del forno domestico

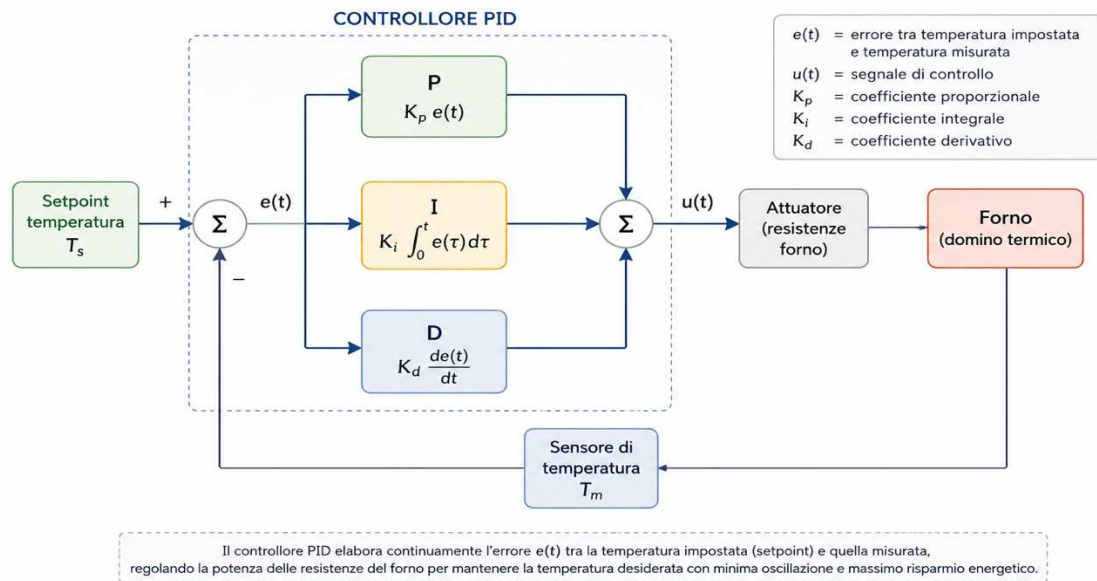


Figura 18 - Schema a circuito chiuso del sistema di controllo PID applicato al forno domestico con feedback della temperatura mediante sensore NTC e regolazione continua della potenza delle resistenze. *Fonte: Elaborato dell'autore.*

4.4 cappe: classificazione, sensoristica e integrazione con i piani cottura

Il sistema di aspirazione domestico, composto dalle cappe da cucina, rappresenta un elemento fondamentale nel controllo della qualità dell'aria indoor negli ambienti residenziali. La loro funzione principale è quella di rimuovere vapori, odori, aerosol grassi e prodotti della combustione generati durante la preparazione degli alimenti, contribuendo al mantenimento delle condizioni microclimatiche interne e alla riduzione dell'esposizione agli inquinanti domestici.

Il loro consumo generalmente è inferiore rispetto a quello di altri elettrodomestici come forni e piani cottura, tuttavia, l'evoluzione tecnologica degli ultimi anni (2015–2025) ha consentito di migliorare l'efficienza energetica anche su questa categoria di apparecchi, grazie all'adozione di sistemi di controllo intelligenti e componenti fluidodinamici ottimizzati.

Dal punto di vista funzionale, le cappe possono essere suddivise in due categorie principali: sistemi ad espulsione esterna, che convogliano l'aria verso l'esterno dell'edificio, e sistemi

a ricircolo, nei quali l'aria viene trattata mediante filtri metallici e filtri a carbone attivo e successivamente reimpressa nell'ambiente interno. Nei sistemi a ricircolo, l'efficienza di rimozione degli inquinanti è descritta attraverso il Clean Air Delivery Rate (CADR) e risulta fortemente dipendente dalla cinetica di adsorbimento dei contaminanti (Kim et al., 2021).

Il funzionamento aerodinamico della cappa è strettamente legato alla capacità di intercettare il “pennacchio termico” (thermal plume) generato dai piani di cottura. Questo flusso ascensionale si forma per effetto della spinta di Archimede, ed è causato dalla differenza di densità tra aria calda e ambiente:

$$\Delta\rho = \rho_{amb} - \rho_{plume}$$

dove:

- ρ_{amb} = densità dell'aria ambiente
- ρ_{plume} = densità del flusso caldo

La corretta captazione del pennacchio richiede che la portata aspirata dalla cappa sia sufficiente a intercettare l'intero flusso convettivo prima della dispersione nell'ambiente. La portata volumetrica aspirata può essere espressa come:

$$V_{dot} = v \cdot A$$

dove:

- V_{dot} = portata volumetrica
- v = velocità media del flusso aspirato
- A = area efficace di captazione

Le prestazioni del sistema dipendono anche dalle perdite di carico lungo i condotti che influenzano la potenza richiesta al motore. Tali perdite possono essere descritte mediante l'equazione di Darcy–Weisbach:

$$\Delta P_{loss} = f \cdot \left(\frac{L}{D_h} \right) \cdot \left(\frac{\rho \cdot v^2}{2} \right) + \Sigma \xi \cdot \left(\frac{\rho \cdot v^2}{2} \right)$$

dove:

- f = fattore di attrito
- L = lunghezza del condotto
- D_h = diametro idraulico
- ρ = densità del fluido
- v = velocità media
- ξ = coefficienti di perdita localizzata

(Zhang & Cao, 2020)

Dal punto di vista costruttivo, il componente principale del sistema è il ventilatore o motore (blower), responsabile della generazione della depressione necessaria all'aspirazione dei fumi. Negli ultimi anni i motori tradizionali a velocità fissa sono stati progressivamente sostituiti da motori brushless, caratterizzati da maggiore efficienza energetica, minori perdite meccaniche e migliore modulazione della portata.

Inoltre l'evoluzione tecnologica ha introdotto l'integrazione di sensoristica avanzata, che rappresenta uno degli sviluppi più significativi del periodo 2015–2025. Sensori di temperatura, umidità e VOC (composti organici volatili) consentono di monitorare in tempo reale l'intensità della cottura e la qualità dell'aria indoor.

In particolare, i sensori MOS (Metal Oxide Semiconductor) rilevano la concentrazione di gas attraverso la variazione della resistenza elettrica del materiale sensibile:

$$R = A \cdot C^\alpha$$

dove:

- R = resistenza del sensore
- C = concentrazione del gas
- A = costante del materiale
- α = coefficiente empirico

(Sberveglieri, 2019)

Questi sistemi permettono di modificare automaticamente la velocità del ventilatore, evitando il funzionamento continuo alla massima potenza e riducendo sia i consumi energetici sia la rumorosità.

Un'innovazione particolarmente rilevante è rappresentata dai sistemi "Hob-to-Hood", nei quali piano cottura e cappa comunicano tra loro mediante protocolli wireless (Wi-Fi o Bluetooth Low Energy). Il piano trasmette in tempo reale dati relativi a potenza e temperatura, consentendo alla cappa di anticipare lo sviluppo del pennacchio termico e regolare dinamicamente la portata di aspirazione.

Questa strategia di controllo anticipato migliora l'efficienza di aspirazione e riduce i consumi energetici complessivi, con riduzioni che secondo il Joint Research Centre possono raggiungere fino al 30% rispetto ai sistemi manuali (JRC, 2024). Inoltre, si ottiene una significativa riduzione del rumore aerodinamico poiché si evita di far funzionare l'apparecchio al massimo regime.

Dal punto di vista progettuale, è stato fatto un ulteriore miglioramento grazie all'ottimizzazione fluidodinamica dei componenti. Giranti, condotti e sistemi di filtrazione vengono oggi progettati mediante simulazioni CFD (Computational Fluid Dynamics), che consentono di ridurre le perdite di carico e migliorare l'efficienza globale del sistema a parità di potenza assorbita.

Nel contesto degli edifici ad alta efficienza energetica, il ruolo delle cappe assume un'importanza crescente. L'elevata tenuta all'aria degli involucri moderni, infatti, riduce le infiltrazioni naturali e rende necessario un controllo attivo e localizzato della qualità dell'aria interna, senza compromettere il bilancio energetico complessivo dell'edificio.

Per questo motivo, i sistemi più avanzati si basano su principi di funzionamento adattivo e intelligente, integrati con sensori e algoritmi di controllo che ottimizzino automaticamente la ventilazione in funzione delle reali condizioni operative.

L'evoluzione tecnologica delle cappe aspiranti dimostra come il miglioramento dei sistemi di ventilazione domestica possa contribuire in modo significativo alla riduzione dei consumi energetici, al miglioramento della qualità dell'aria indoor e alla sostenibilità complessiva degli ambienti residenziali.

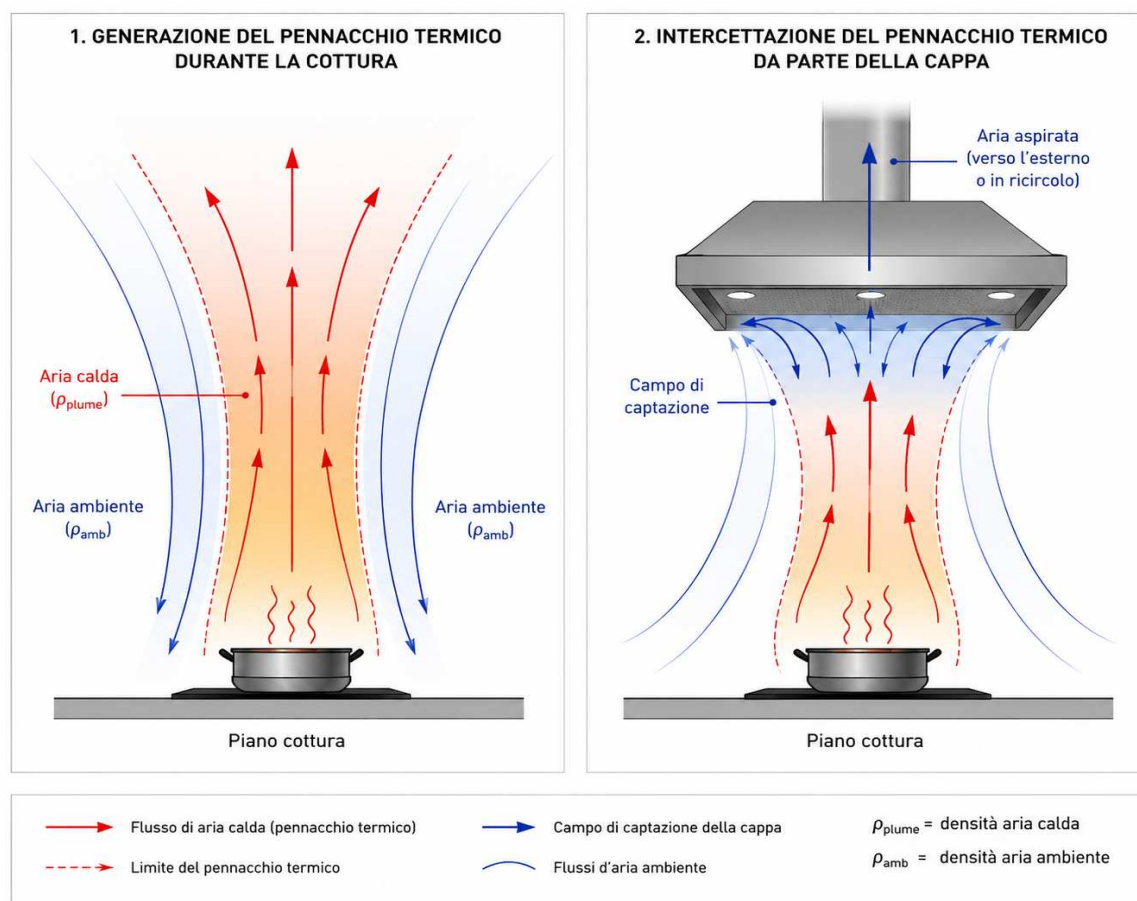


Figura 19 - Schema del pennacchio termico generato dal piano di cottura e del flusso convettivo ascensionale responsabile del trasporto degli inquinanti indoor (1). Schema del campo di captazione della cappa aspirante e intercettazione del pennacchio termico generato dal piano di cottura (2). *Fonte: Elaborato dell'autore.*

4.5 Impatto energetico complessivo nella cucina domestica

La determinazione dell'impatto energetico complessivo associato agli elettrodomestici della zona cottura rappresenta uno degli aspetti più complessi nella progettazione del sistema edificio-impianto, richiedendo un'analisi dettagliata basata sulle interazioni energetiche e fluidodinamiche tra i piani cottura a induzione, i forni multifunzione e i sistemi di ventilazione delle cappe. All'interno del bilancio energetico complessivo di un'unità immobiliare contemporanea, questi apparecchi non possono essere valutati unicamente

attraverso la sommatoria dei consumi nominali dei singoli dispositivi, ma devono essere esaminati in funzione del loro accoppiamento termofisico e fluidodinamico con il volume confinato (Awbi, 2017).

L'impatto energetico totale in termini di energia primaria ($E_{p, tot}$) può essere formalizzato attraverso la seguente equazione di bilancio estesa:

$$E_{p,tot} = \Sigma(E_{f,i} \cdot f_{p,i}) + \Delta E_{p,HVAC}$$

nella quale $E_{f,i}$ rappresenta il consumo di energia finale dell' i -esimo dispositivo (piano a induzione, forno o cappa), $f_{p,i}$ indica il fattore di conversione in energia primaria caratteristico del vettore elettrico, mentre $\Delta E_{p,HVAC}$ esprime la variazione netta del fabbisogno energetico primario dei sistemi di climatizzazione e ventilazione meccanica indotta dai flussi termici e di massa generati dai sistemi di cottura.

Il primo termine dell'Equazione è direttamente proporzionale al tipo di generatori scelti. L'adozione del piano a induzione elimina le perdite associate alla mancata captazione della fiamma tipiche dei sistemi a gas, operando con un rendimento energetico (η_I) di norma superiore all'85% (JRC, 2022).

Parallelamente, i forni multifunzione di ultima generazione minimizzano l'energia finale per ciclo, raggiungendo valori inferiori a 0,6 kWh/ciclo, grazie all'impiego di logiche di controllo PID che riducono le oscillazioni di temperatura e grazie anche all'abbattimento della trasmittanza termica globale (U) ottenuto mediante isolanti ad alte prestazioni (JRC, 2022; Regolamento UE n. 66/2014).

Questo significativo miglioramento dei consumi diretti si riflette positivamente sull'indice di prestazione energetica globale dell'edificio, facilitando l'integrazione con sistemi di generazione rinnovabile locale, quali impianti fotovoltaici, e con sistemi avanzati di gestione energetica (Building Energy Management Systems - BEMS).

La principale criticità ingegneristica si sposta tuttavia sul secondo termine del bilancio ($\Delta E_{p,HVAC}$), che quantifica l'interazione termodinamica tra i dispositivi e l'involucro edilizio.

Nonostante l'elevata efficienza dei sistemi analizzati, la quota di energia non trasferita direttamente agli alimenti si traduce in apporti termici interni sensibili e latenti (q_{int}). In accordo con i metodi di calcolo dinamico definiti dalla norma UNI EN ISO 52016-1, tali apporti modificano l'equilibrio energetico della zona termica (CTI, 2018).

Durante la stagione invernale, il calore rilasciato dagli elettrodomestici contribuisce in parte al riscaldamento degli ambienti interni, riducendo il fabbisogno energetico in funzione del fattore di utilizzazione degli apporti interni ($\eta_{H,gn}$). Durante la stagione estiva, al contrario, lo stesso contributo termico incrementa il fabbisogno di raffrescamento che deve essere compensato dagli impianti HVAC in funzione del relativo coefficiente di prestazione stagionale (CTI, 2018).

A questi effetti termici si aggiunge il contributo delle cappe aspiranti. Nel caso di cappe ad espulsione con una portata d'aria compresa tra 300 e 800 m³/h, si genera una perdita energetica associata alla ventilazione.

La potenza termica dispersa può essere stimata mediante la relazione:

$$\dot{H}_{disp} = \dot{V} \cdot \rho \cdot (h_{int} - h_{est})$$

dove $\dot{V}$ rappresenta la portata volumetrica d'aria estratta, ρ rappresenta la densità dell'aria, h_{int} rappresenta l'entalpia specifica dell'aria interna e h_{est} rappresenta l'entalpia specifica dell'aria esterna (Awbi, 2017).

Negli edifici NZEB caratterizzati da elevata tenuta all'aria ($n_{50} \leq 0,6 \text{ h}^{-1}$), l'espulsione continua di aria climatizzata può interferire con il corretto funzionamento della ventilazione meccanica controllata e determinare perdite energetiche non trascurabili (Awbi, 2017).

Le cappe filtranti a ricircolo ad alta efficienza, dotate di filtri a carboni attivi o sistemi avanzati di abbattimento degli odori, consentono invece di mantenere il ricircolo dell'aria all'interno del volume climatizzato, riducendo sensibilmente il termine di perdita $\dot{H}_{disp}$.

Questa soluzione impiantistica risulta particolarmente efficace quando associata ai piani a induzione. L'assenza di combustione elimina infatti la produzione locale di biossido di azoto

(NO₂), monossido di carbonio (CO) e altri sottoprodotti tipici della combustione del gas, riducendo le esigenze di ventilazione e migliorando la qualità dell'aria interna (ASHRAE, 2022).

L'analisi dell'impatto energetico complessivo evidenzia quindi come il settore dell'elettrodomestico da cucina, se configurato attraverso l'integrazione di piani a induzione, forni multifunzione ad elevata efficienza e cappe a ricircolo ad alte prestazioni, possa trasformarsi da semplice utenza energetica a sottosistema termico e fluidodinamico ottimizzato.

Questa configurazione contribuisce sia ad una riduzione significativa dei consumi diretti di energia, sia ad una limitazione delle dispersioni termiche, dei carichi di climatizzazione e delle criticità legate alla qualità dell'aria indoor, risultando pienamente adatta agli obiettivi di efficienza energetica e decarbonizzazione previsti dalla normativa europea in materia di progettazione ecocompatibile dei prodotti connessi all'energia (Regolamento UE n. 66/2014).

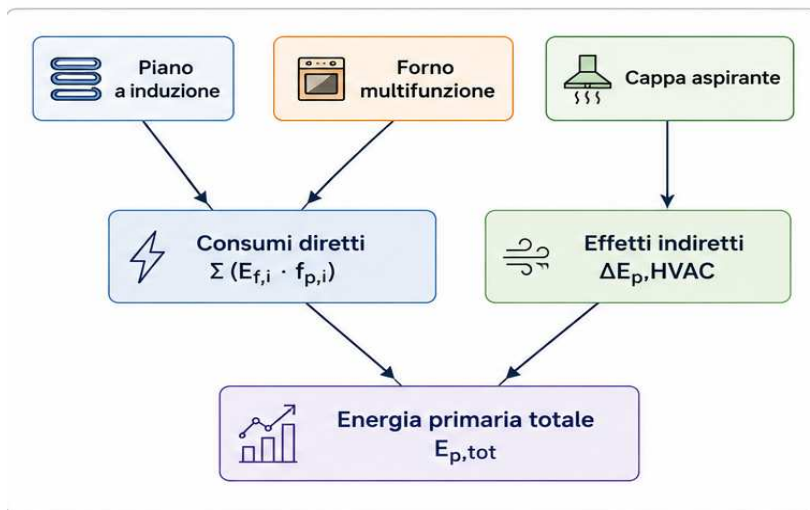


Figura 20 - Schema del bilancio energetico integrato dei sistemi di cottura domestici e contributo al fabbisogno energetico dell'edificio. L'immagine rappresenta la scomposizione del bilancio energetico dei sistemi di cottura domestici in termini di energia finale e contributi indiretti al sistema edificio-impianto. Il diagramma evidenzia come piani a induzione, forni multifunzione e cappe aspiranti non incidano esclusivamente sui consumi diretti, ma influenzino anche il termine $\Delta E_{p,HVAC}$ attraverso l'interazione con i carichi termici interni e le dinamiche di ventilazione dell'ambiente cucina. *Fonte: Elaborato dell'autore.*

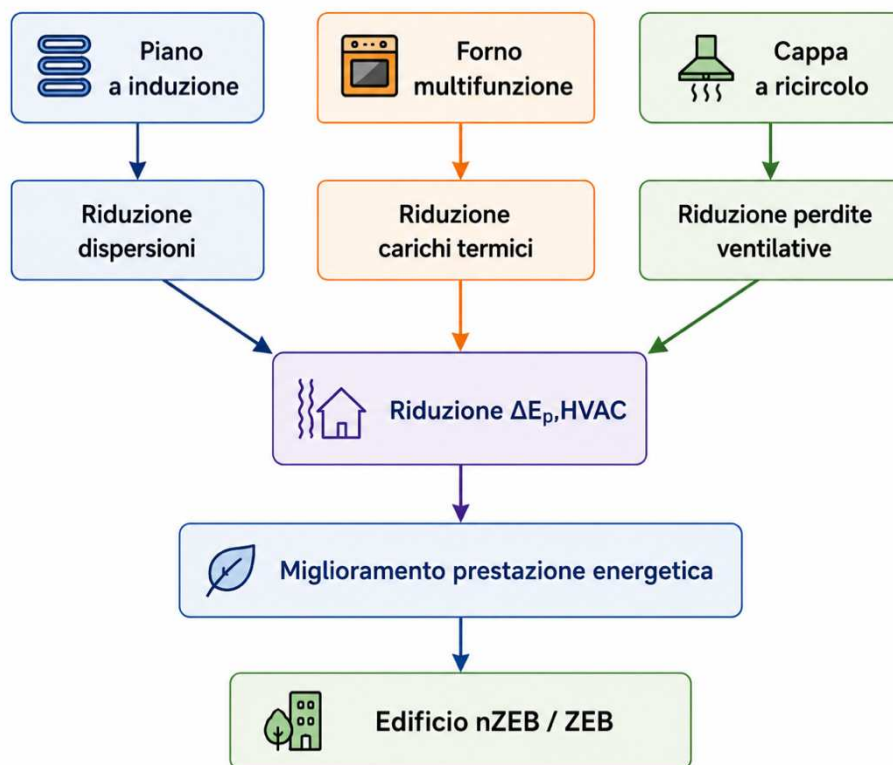


Figura 21 - Interazione tra sistemi di cottura domestici e prestazioni energetiche dell'involucro edilizio. La figura illustra le principali interazioni tra i sistemi di cottura domestici e il comportamento energetico dell'edificio. I contributi termici dei dispositivi si traducono in variazioni dei carichi interni e delle condizioni di ventilazione, influenzando direttamente il fabbisogno energetico dei sistemi HVAC. L'integrazione di piani a induzione, forni multifunzione e cappe a ricircolo consente una riduzione complessiva del termine $\Delta E_{p,HVAC}$ attraverso la minimizzazione delle dispersioni energetiche e delle perdite per ventilazione. Fonte: Elaborato dell'autore.

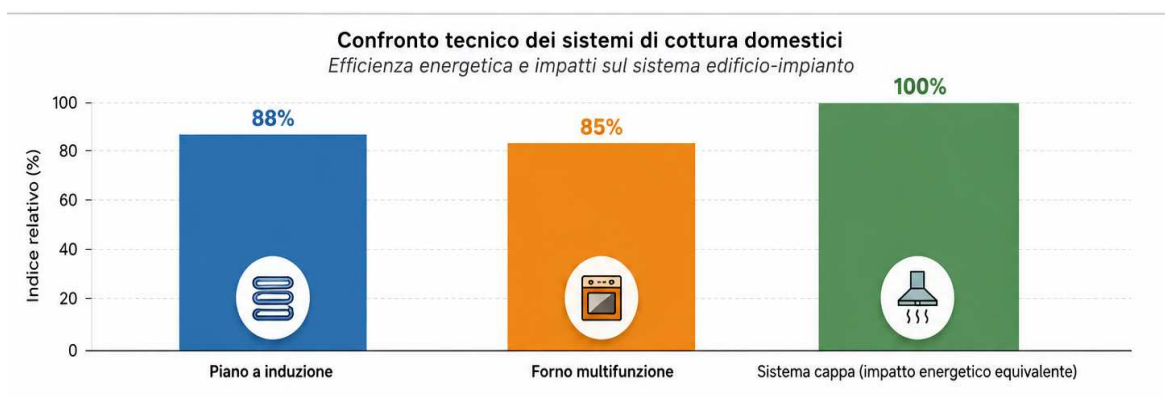


Figura 22 - Confronto dell'efficienza energetica dei principali sistemi di cottura domestici. Confronto qualitativo tra le tecnologie della zona cottura. Per il piano a induzione e il forno multifunzione sono riportati valori indicativi di efficienza energetica, mentre per la cappa il valore rappresenta un indice relativo riferito al contributo sul sistema edificio-impianto e non un rendimento energetico diretto. Fonte: Elaborato dell'autore.

CAPITOLO 5

5.1 Intelligenza artificiale e IoT negli elettrodomestici

Nel decennio 2015–2025, la gestione energetica residenziale ha subito un cambiamento sostanziale, evolvendo da un modello di consumo puramente passivo a un sistema cyber-fisico integrato, guidato dall'unione tra Internet of Things (IoT) e l'Intelligenza Artificiale (AI). Nel contesto dell'Industria 4.0, gli elettrodomestici non vengono più concepiti come unità funzionali isolate tra loro, bensì come apparecchi intelligenti e interconnessi che operano all'interno di ecosistemi energetici più ampi e sono componenti attivi della Smart-home e dello Smart-building (Aheleroff et al., 2020). Questa rete di dispositivi costituisce la base dei moderni sistemi di gestione dell'energia domestica, noti come Home Energy Management Systems (HEMS). Questi sistemi sfruttano protocolli di comunicazione bidirezionale per coordinare il funzionamento dei carichi domestici in funzione della disponibilità energetica, delle tariffe elettriche e della produzione locale da fonti rinnovabili (Adebiyi et al., 2025; Mischos et al., 2022).

Dal punto di vista strutturale, i sistemi più evoluti adottano un modello stratificato costituito da sensori/attuatori, edge computing, gateway e piattaforme cloud, che consentono l'elaborazione locale dei dati riducendo i tempi di risposta e limitando la quantità di informazioni da trasferire verso i server remoti.

L'edge computing applicato a IoT (EC-IoT) si articola tipicamente su tre livelli, end edge, network edge e cloud edge, combinando strategie di scheduling ottimale delle operazioni dei singoli elettrodomestici con l'obiettivo di minimizzare i costi dell'energia elettrica. L'intelligenza artificiale consente di sfruttare al meglio le potenzialità di questa infrastruttura grazie all'impiego di algoritmi di machine learning capaci di analizzare grandi volumi di dati operativi, identificare le tipologie di consumo da parte degli utenti e adattare automaticamente il comportamento dei dispositivi alle condizioni ambientali rilevate dai sensori (Pasqualetto et al., 2024; Szydlo et al., 2020).

La struttura di un HEMS basato sull'AI comprende due funzioni principali: il riconoscimento del carico e la previsione della domanda. Per ottimizzare i consumi senza gravare sui costi

hardware, la ricerca si è focalizzata sul Non-Intrusive Load Monitoring (NILM), una tecnica che consente di suddividere il consumo energetico complessivo dell'abitazione nei contributi dei singoli elettrodomestici senza installare sensori aggiuntivi per ogni dispositivo.

Attraverso l'impiego di modelli di deep learning applicati ai dati di consumo acquisiti ad alta frequenza nel punto di consegna dell'energia elettrica, è possibile identificare il contributo energetico e lo stato operativo dei singoli elettrodomestici; metodi LSTM, XGBoost e DTW-KNN sono stati progressivamente applicati e validati per migliorare la suddivisione dei carichi (Azad, Rajabi & Estebarsari, 2023). Alcuni studi hanno dimostrato che un modello Fine K-Nearest Neighbors, addestrato utilizzando i dati provenienti da un solo sensore di corrente, è in grado di identificare gli elettrodomestici attivi con un'accuratezza superiore al 99%. Ciò suggerisce che il riconoscimento dei carichi domestici possa essere effettuato in modo affidabile anche con sistemi di monitoraggio relativamente semplici (Pereira et al., 2026).

Parallelamente, le reti neurali ricorrenti, come per esempio il Long Short Term Memory (LSTM), consentono di stimare il fabbisogno energetico analizzando i dati storici di consumo e le condizioni ambientali rilevate dai vari sensori. Approcci che combinano dati IoT, machine learning e intelligenza artificiale spiegabile (XAI) migliorano sia l'accuratezza delle previsioni sia la comprensione dei risultati ottenuti, rendendo la gestione dei consumi energetici degli edifici più efficace. (Rahman et al., 2025). Risultati simili emergono utilizzando modelli ibridi basati su LSTM e ARIMA. In un recente studio, un sistema di monitoraggio smart basato su Raspberry Pi e modello LSTM ha raggiunto un'accuratezza delle previsioni dell'80%, con bassi valori di errore quadratico medio e alti punteggi R^2 , dimostrando una buona capacità nel rilevamento di anomalie nei profili di utilizzo. Per specifiche categorie di elettrodomestici, come i sistemi di condizionamento e ventilazione, algoritmi Bidirectional GRU e Stacked LSTM hanno raggiunto accuratezze di validazione rispettivamente del 99,81% e del 99,64% nell'analisi della qualità dell'aria interna (IAQ), superando i limiti dei metodi tradizionali legati a dataset ridotti e scarsa adattabilità (Saini, Arora & Kamboj, 2025).

L'applicazione di questi algoritmi predittivi ed intelligenti si traduce in ottimizzazioni termodinamiche e operative tangibili per specifiche classi di elettrodomestici. Nei sistemi di

refrigerazione, la tecnologia inverter guidata da AI modula dinamicamente i cicli di sbrinamento e il regime del compressore, memorizzando le consuetudini di apertura delle porte e le variazioni di carico termico, riducendo le irreversibilità tipiche dei cicli frigoriferi tradizionali. Nei sistemi di cottura, in particolare nei piani cottura ad induzione e nei forni multifunzione, i sensori IoT monitorano le variazioni termiche in tempo reale, consentendo all'unità logica di calibrare l'assorbimento elettrico per mantenere l'efficienza di scambio vicina ai valori ideali. Le lavastoviglie, analogamente, adattano dinamicamente i cicli di lavaggio in funzione del livello di torbidità dell'acqua misurato dai sensori, minimizzando il consumo idrico e l'energia necessaria al riscaldamento del fluido termovettore. Sul piano infrastrutturale hardware, soluzioni a basso costo come l'IoT Smart Household Distribution Board (ISHDB), basato su Arduino e collegato alla piattaforma ThingSpeak via Wi-Fi, hanno dimostrato una concreta fattibilità applicativa, risultando superiori alle tecniche esistenti in termini di costo di implementazione e tempo di esecuzione per la gestione energetica domestica in tempo reale (Ahmed & Qays, 2021).

Dal punto di vista dell'ottimizzazione globale, il coordinamento di questi vettori energetici trasforma l'edificio residenziale in un soggetto attivo all'interno della rete. Sistemi di ottimizzazione avanzata e modelli di Reinforcement Learning (RL) elaborano in tempo reale i segnali di prezzo fluttuanti del mercato elettrico e la disponibilità di fonti rinnovabili locali, spostando o modulando il funzionamento degli elettrodomestici nelle fasce orarie più convenienti. Questo approccio minimizza il Peak-to-Average Ratio sulla rete, migliora le prestazioni energetiche complessive del comparto civile e riduce significativamente l'impronta di carbonio dell'edificio. Una revisione sistematica condotta con protocollo PRISMA su studi dal 2018 al 2025 conferma questo quadro d'insieme, evidenziando come machine learning, logica fuzzy, sistemi predittivi ibridi e reinforcement learning abbiano prodotto miglioramenti sostanziali nel processo decisionale in tempo reale e nelle tecniche di scheduling adattivo. Tra gli sviluppi più recenti rientrano sistemi di intelligenza artificiale distribuiti, tecniche di apprendimento che garantiscono una maggiore tutela della privacy degli utenti e strategie di controllo avanzato per il coordinamento automatico di più dispositivi connessi (Wavale & Sireesha, 2025; Aldahmashi & Ma, 2024). Sul piano ambientale e normativo, affinché questi benefici siano pienamente realizzati, in coerenza con gli obiettivi di sostenibilità e decarbonizzazione previsti dalle politiche energetiche

europee, risulta tuttavia indispensabile affrontare le problematiche residue legate alla sicurezza informatica, alla protezione dei dati personali e ai consumi energetici associati alle infrastrutture digitali stesse (Aheleroff et al., 2020; Pasqualetto et al., 2024).

5.2 Nuovi materiali ad alta efficienza

Nel quadro dell'evoluzione normativa dettata dalla Direttiva Ecodesign (inclusi i Regolamenti UE 66/2014 e 65/2014 per il decennio 2015-2025), l'incremento dell'efficienza energetica degli elettrodomestici moderni non dipende esclusivamente dall'ottimizzazione dei sistemi elettronici, ma anche dall'impiego di materiali isolanti avanzati. In un'ottica di ingegneria civile e ambientale, la riduzione del fabbisogno energetico del singolo dispositivo si traduce direttamente in una diminuzione dei consumi elettrici e in un miglioramento delle prestazioni energetiche complessive del settore residenziale.

Dal punto di vista della fisica tecnica, il trasferimento di calore attraverso le pareti di un elettrodomestico avviene per conduzione, convezione e irraggiamento. In accordo con la legge di Fourier:

$$q = \lambda \cdot A \cdot \Delta T / s$$

dove:

- q = flusso termico (W)
- λ = conducibilità termica del materiale (W/m·K)
- A = superficie di scambio (m²)
- ΔT = differenza di temperatura (K)
- s = spessore del materiale (m)

Il flusso termico risulta direttamente proporzionale alla conducibilità termica del materiale; di conseguenza, ridurre il valore di λ rappresenta una delle strategie più efficaci per limitare le dispersioni energetiche (Papetti et al., 2017). Per superare i limiti dei coibenti tradizionali, l'industria ha introdotto i cosiddetti Super Insulation Materials (SIM), i quali intervengono sui meccanismi di trasporto del calore a livello micro e nanoscopico.

Tra le soluzioni utilizzate per gli elettrodomestici che operano a bassa temperatura, come frigoriferi e congelatori, troviamo i Vacuum Insulation Panels (VIP). Questi pannelli sono costituiti da un nucleo microporoso racchiuso in un involucro ad elevata barriera ai gas, all'interno del quale viene creato il vuoto. In tali condizioni si verifica il cosiddetto effetto Knudsen, per cui il libero cammino medio delle molecole diventa confrontabile o superiore alle dimensioni dei pori del materiale, riducendo drasticamente le collisioni intermolecolari e annullando quasi completamente i fenomeni convettivi (NANOPOROUSVIP Project, 2016).

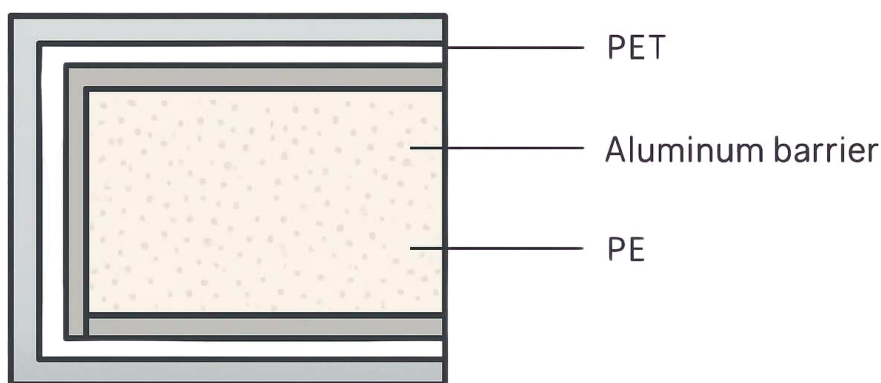
Grazie a questo principio fisico, i pannelli VIP raggiungono valori di conducibilità termica compresi tra 0,0039 e 0,0043 W/m·K, nettamente inferiori rispetto alle tradizionali schiume poliuretaniche, che presentano generalmente valori compresi tra 0,020 e 0,030 W/m·K. A parità di spessore, ciò consente una riduzione del flusso termico superiore all'80%, permettendo di aumentare il volume utile interno degli apparecchi senza modificarne le dimensioni esterne (NANOPOROUSVIP Project, 2016).

Per le applicazioni ad alta temperatura, come i forni domestici multifunzione, trovano crescente impiego gli aerogel nanostrutturati a base di silice. Questi materiali sono costituiti per oltre il 90% da aria intrappolata all'interno di nanopori e presentano valori di conducibilità termica compresi tra 0,013 e 0,015 W/m·K. L'elevata porosità riduce simultaneamente i fenomeni di conduzione nel solido e di convezione nel gas, garantendo ottime prestazioni isolanti anche in condizioni di temperature elevate.

Parallelamente, la transizione verso modelli produttivi più sostenibili ha orientato la ricerca verso materiali isolanti derivati da risorse rinnovabili o da sottoprodotti industriali. Le strutture a base di cellulosa e altri materiali lignocellulosici presentano una matrice altamente porosa in grado di intrappolare aria, la cui conducibilità termica è pari a circa 0,026 W/m·K (Aksamija, 2016). La presenza di pori di piccole dimensioni limita la formazione di moti convettivi interni e contribuisce a migliorare le prestazioni isolanti del materiale. Inoltre, tali soluzioni risultano particolarmente interessanti dal punto di vista ambientale grazie alla riduzione delle emissioni di composti organici volatili (VOC) e al loro minore impatto lungo il ciclo di vita.

Anche le tradizionali schiume poliuretaniche ad alte prestazioni hanno subito una significativa evoluzione tecnologica. Le nuove formulazioni sono caratterizzate da strutture cellulari più uniformi e da celle chiuse di dimensioni ridotte, che consentono di limitare ulteriormente il trasporto di calore. Parallelamente, la progressiva eliminazione degli agenti espandenti caratterizzati da elevato Global Warming Potential (GWP) ha contribuito a ridurre sensibilmente l'impatto ambientale associato alla produzione di questi materiali (Favi et al., 2020).

L'attenzione all'efficienza energetica risulta oggi strettamente connessa ai principi del Life Cycle Assessment (LCA) e dell'ecodesign. La scelta dei materiali isolanti deve infatti considerare simultaneamente prestazioni termiche, durabilità, riciclabilità e impatto ambientale lungo l'intero ciclo di vita del prodotto. L'impiego di materiali innovativi ad alta efficienza contribuisce non solo alla riduzione dei consumi energetici degli elettrodomestici, ma anche alla diminuzione delle emissioni indirette associate alla produzione di energia elettrica, favorendo il raggiungimento degli obiettivi europei di sostenibilità ed economia circolare nel settore civile (Ardente & Talens Peiró, 2015; Papetti et al., 2017).



Nanoporous silica powder

Figura 23 - Sezione trasversale schematica di un pannello isolante sottovuoto (VIP), che evidenzia la stratigrafia dell'involucro multistrato (PET, barriera in alluminio, PE) che racchiude il nucleo di silice nanoporosa. *Fonte: Elaborato dell'autore.*

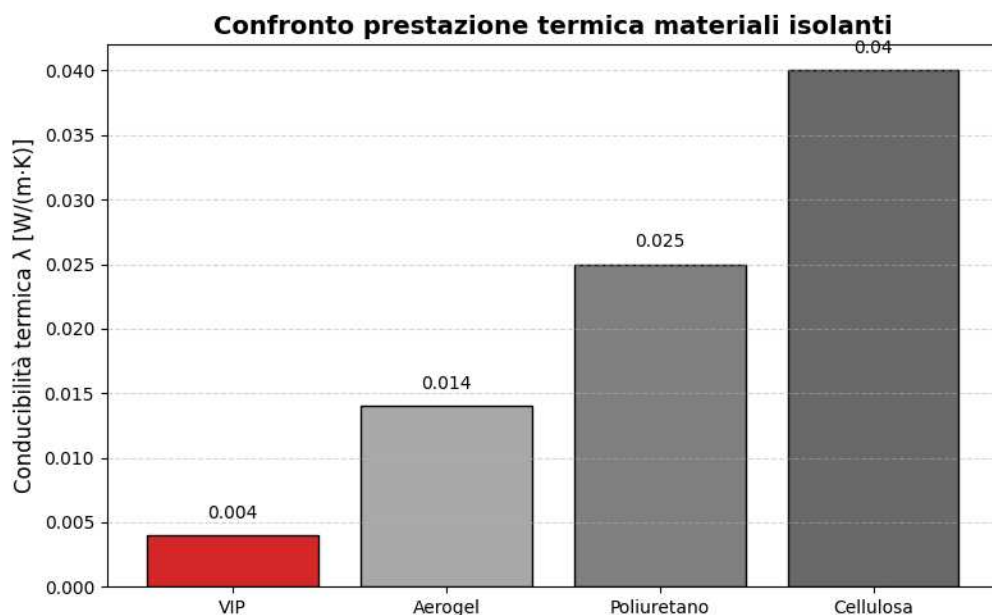


Figura 24 - Confronto tra la conducibilità termica (λ) di isolanti avanzati (VIP e Aerogel) e materiali isolanti convenzionali (Poliuretano e Cellulosa). Il grafico evidenzia come la tecnologia dei pannelli sottovuoto consenta una riduzione della conducibilità termica di quasi un ordine di grandezza rispetto ai coibenti tradizionali. *Fonte: Elaborato dell'autore.*

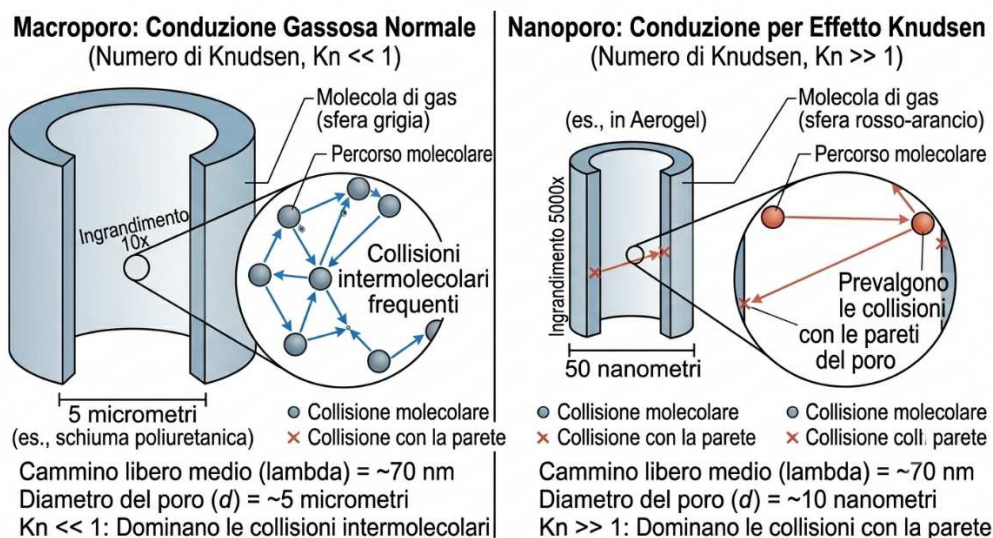


Figura 25 - Schema concettuale dell'Effetto Knudsen e confronto tra i meccanismi di trasporto termico nei macropori (ad esempio schiume poliuretantiche, $Kn \ll 1$) e nei nanopori (ad esempio aerogel e pannelli isolanti sottovuoto VIP, $Kn \gg 1$). *Fonte: Elaborato dell'autore.*

Si osserva come, nella condizione di nanoporosità, il libero cammino medio delle molecole diventi confrontabile con le dimensioni caratteristiche dei pori, rendendo predominanti le collisioni tra molecole e pareti rispetto alle collisioni intermolecolari. Tale fenomeno

determina una drastica riduzione dei processi di conduzione e convezione gassosa, con conseguente abbattimento della conducibilità termica del materiale.

CAPITOLO 6

6.1 Sintesi dei risultati dell'analisi

Pur trattandosi di un'analisi in fase di sviluppo, i dati presenti in letteratura consentono di individuare alcune tendenze consolidate che verranno approfondite nel corso del lavoro.

Nel periodo 2015–2025, gli elettrodomestici da incasso hanno registrato un'evoluzione significativa in termini di efficienza energetica, determinata dalla combinazione tra innovazioni tecnologiche, miglioramenti progettuali e adeguamenti normativi a livello europeo (European Commission, 2024).

In particolare, per quanto riguarda i sistemi di refrigerazione, è emerso che l'introduzione dei compressori inverter rappresenta uno degli elementi più rilevanti nel miglioramento delle prestazioni energetiche, consentendo una riduzione dei consumi e una maggiore stabilità operativa (International Energy Agency, 2023). L'adozione di sistemi No-Frost e di ventilazione avanzata ha inoltre contribuito a ottimizzare l'efficienza complessiva e la conservazione degli alimenti.

In merito ai piani cottura, l'analisi ha evidenziato la crescente diffusione della tecnologia a induzione unita a diversi livelli di tecnologia delle zone e del tipo di induttori. E' stato appurato come essa sia caratterizzata da un'elevata efficienza energetica rispetto ai sistemi tradizionali, grazie alla riduzione delle dispersioni termiche e a un trasferimento diretto del calore (International Energy Agency, 2023). Tuttavia, nella realtà l'efficienza risulta influenzata anche dalle modalità di utilizzo e dalle caratteristiche degli utensili impiegati.

Per quanto riguarda i forni multifunzione, i risultati mostrano come l'impiego di materiali isolanti avanzati, vetri multipli e sistemi di ventilazione evoluti abbia consentito una riduzione significativa delle perdite di calore, migliorando al contempo l'uniformità della cottura e l'efficienza energetica complessiva (European Commission, 2024). Inoltre,

l'integrazione di sistemi come le microonde e il controllo intelligente tramite AI, hanno portato ad una riduzione dei tempi di cottura ed un'ottimizzazione dei consumi energetici.

Relativamente alle cappe, studi recenti evidenziano come la cottura rappresenti una delle principali fonti di inquinamento indoor, rendendo quindi fondamentale l'efficacia dei sistemi di ventilazione (Han et al., 2019). A tal proposito, l'innovazione tecnologica si sta orientando verso soluzioni in grado di migliorare non solo la portata e l'efficienza di sistema, ma anche la qualità nella captazione dei fumi. Tra queste possiamo citare i ventilatori ausiliari in serie (supercharging fan), i sistemi di gestione dei flussi d'aria e i sensori intelligenti, che complessivamente hanno dimostrato di incrementare significativamente la pressione disponibile, la capacità di estrazione e regolare in modo dinamico la potenza di aspirazione in funzione della presenza di odori e vapori (Zhang et al., 2024).

Nel complesso, i risultati evidenziano come i miglioramenti più rilevanti derivino dall'integrazione sinergica tra componenti tecnologiche, sistemi di controllo e modalità d'uso. Tale evidenza conferma che l'efficienza energetica degli elettrodomestici da incasso rappresenta il risultato di un processo evolutivo complesso e multidimensionale.

6.2 Impatto dell'innovazione tecnologica sui consumi energetici

I risultati vanno inseriti in un contesto più ampio, che evidenzia come l'innovazione tecnologica abbia contribuito in modo significativo alla riduzione dei consumi energetici nel settore domestico (International Energy Agency, 2024).

Negli ultimi anni, l'introduzione di standard normativi e sistemi di etichettatura energetica ha accelerato la progettazione e il conseguente miglioramento delle prestazioni degli elettrodomestici, portando a una riduzione dei consumi fino al 50% per alcune categorie di prodotti (IEA, 2024; European Commission, 2024). Parallelamente, queste strategie hanno determinato una riduzione dei costi energetici per i consumatori e un miglioramento complessivo dell'efficienza del sistema energetico europeo.

Questi risultati sono coerenti con quelli descritti dalla letteratura più consolidata, che già evidenziava come l'evoluzione dell'efficienza energetica degli elettrodomestici avesse determinato una riduzione dei consumi complessivi, pur senza incidere in maniera significativa sui picchi di domanda elettrica nel settore residenziale (REMODECE Project, 2011). Questo risultato sottolinea come il miglioramento tecnologico del singolo dispositivo, pur efficace nella riduzione dei consumi totali, non sia sufficiente a garantire una gestione ottimale della domanda energetica complessiva.

L'innovazione tecnologica ha inoltre favorito la diffusione degli elettrodomestici smart e dei sistemi di gestione energetica domestica, che consentono una gestione più efficiente e flessibile dei carichi elettrici (IEA, 2025). In questa ottica, i recenti studi evidenziano come i sistemi Smart Home Energy Management Systems (SHEMS), basati su algoritmi di ottimizzazione e tecniche di intelligenza artificiale, permettano una riduzione significativa dei costi energetici e un miglioramento del bilanciamento del carico domestico (Zhou et al., 2025).

In particolare, la letteratura evidenzia come l'impiego di algoritmi di ottimizzazione avanzata e tecniche di machine learning possa migliorare la gestione dei carichi domestici, riducendo i picchi di assorbimento elettrico e favorendo lo sviluppo di sistemi energetici sempre più adattivi e predittivi (Alam et al., 2025).

Ulteriori evidenze derivano dagli studi sull'integrazione di IoT e intelligenza artificiale negli elettrodomestici intelligenti, che mostrano come la combinazione tra sensori, connettività e algoritmi predittivi consenta un'ottimizzazione in tempo reale dei consumi energetici e idrici, contribuendo alla sostenibilità complessiva del sistema domestico (Khan et al., 2025). In questo contesto, gli elettrodomestici – dai sistemi di refrigerazione ai piani cottura, fino ai forni e ai sistemi di ventilazione – assumono un ruolo attivo all'interno di un ecosistema interconnesso, in cui i dati raccolti vengono utilizzati per migliorare continuamente le prestazioni e adattare il funzionamento alle esigenze dell'utente e alle condizioni energetiche disponibili.

Inoltre, studi applicativi su singole categorie di elettrodomestici, come i sistemi di refrigerazione domestica, evidenziano come l'ottimizzazione dei cicli di funzionamento e

l'impiego di strategie di controllo avanzato possano generare ulteriori risparmi energetici significativi, confermando il ruolo cruciale dell'innovazione anche a livello di singolo dispositivo (Li et al., 2025).

Nel complesso, l'impatto dell'innovazione tecnologica non si limita alla riduzione dei consumi energetici, ma contribuisce in maniera significativa alla transizione verso sistemi energetici più sostenibili, digitalizzati e interconnessi (IEA, 2024). In tale prospettiva, l'integrazione tra Internet of Things e intelligenza artificiale rappresenta un elemento chiave per il futuro degli elettrodomestici domestici, consentendo il passaggio da dispositivi efficienti a sistemi intelligenti capaci di interagire, apprendere e ottimizzare dinamicamente il proprio funzionamento all'interno dell'ambiente domestico (IEA, 2025; Khan et al., 2025).

6.3 Limiti dello studio e sviluppi futuri della ricerca

Nonostante i risultati evidenziati, il presente studio presenta alcune limitazioni che devono essere considerate.

In primo luogo, l'analisi si basa su dati medi e su studi di letteratura, che potrebbero non rispecchiare perfettamente il reale comportamento del consumatore finale. Il consumo energetico degli elettrodomestici è infatti fortemente influenzato dalle modalità di utilizzo e dalle condizioni operative (IEA, 2023). Tale aspetto è confermato anche dagli studi di modellazione dei carichi domestici, nei quali si evidenzia come la variabilità dei comportamenti introduce significative differenze nei profili di consumo (REMODECE-based residential load study, 2011).

In secondo luogo, la crescente diffusione di tecnologie avanzate e sistemi intelligenti introducono problematiche legate alla disponibilità e alla qualità dei dati, nonché alla complessità di progettazione dei modelli di ottimizzazione. Studi recenti evidenziano come i sistemi basati su intelligenza artificiale possano presentare limiti in termini di scalabilità, dipendenza dai dati e applicabilità su larga scala (Systematic Review of Optimization Methodologies for Smart Home Energy Management Systems, 2025; IEA, 2025).

Un altro aspetto critico riguarda la comunicazione e l'interazione tra dispositivi di diversi produttori, oltre alla mancanza di standard condivisi. Questi sono elementi che possono ostacolare lo sviluppo di sistemi energetici domestici pienamente integrati (European Commission, 2024). In aggiunta, la letteratura sottolinea come l'eterogeneità delle soluzioni IoT e la frammentazione dei protocolli rappresentino ulteriori ostacoli all'applicazione su larga scala di sistemi di gestione energetica avanzati (Smart Home Appliances for a Sustainable Future, 2025).

Le future attività di ricerca e sviluppo si orienteranno sempre di più verso sistemi più integrati, intelligenti e sostenibili.

In particolare, si prevede un crescente utilizzo di tecniche di intelligenza artificiale e modelli predittivi per la gestione dinamica dei consumi energetici, in grado di adattarsi alle condizioni ambientali, alle tariffe energetiche e ai comportamenti degli utenti (International

Energy Agency, 2025). Le revisioni recenti confermano come l'evoluzione verso algoritmi ibridi e sistemi di apprendimento automatico rappresenti uno degli ambiti di maggiore interesse per migliorare l'efficienza dei sistemi domestici (Systematic Review of Optimization Methodologies for Smart Home Energy Management Systems, 2025).

Parallelamente, le politiche europee continueranno a svolgere un ruolo centrale nel promuovere l'efficienza energetica e nel guidare l'innovazione tecnologica, contribuendo al raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità e riduzione delle emissioni (European Commission, 2024).

Un ulteriore ambito di sviluppo riguarda l'integrazione degli elettrodomestici con sistemi di generazione distribuita, come impianti fotovoltaici e sistemi di accumulo, favorendo la realizzazione di abitazioni sempre più autonome e intelligenti (IEA, 2024). In questo contesto, la letteratura evidenzia come l'evoluzione verso smart grid e sistemi domestici attivi rappresenti un passaggio fondamentale nella transizione energetica (Smart Home Appliances for a Sustainable Future, 2025).

Guardando al medio-lungo termine, l'evoluzione del settore sarà sempre più caratterizzata dall'integrazione tra efficienza energetica, digitalizzazione ed economia circolare. Gli elettrodomestici tenderanno a essere concepiti non più come dispositivi autonomi, ma come componenti attivi di sistemi energetici domestici integrati, in grado di interagire dinamicamente con l'edificio, con le fonti rinnovabili e con la rete elettrica. Parallelamente, lo sviluppo di materiali innovativi ad alte prestazioni, l'adozione di criteri di progettazione orientati al ciclo di vita e il rafforzamento delle politiche europee in materia di sostenibilità contribuiranno a ridurre ulteriormente l'impatto ambientale del comparto residenziale. A questo proposito, la capacità di coniugare innovazione tecnologica, interoperabilità dei sistemi e sostenibilità ambientale rappresenterà un elemento fondamentale per il raggiungimento degli obiettivi di decarbonizzazione e di efficientamento energetico previsti a livello europeo nei prossimi decenni (European Commission, 2024; IEA, 2025).

CONCLUSIONI

L'evoluzione degli elettrodomestici da incasso non si può limitare soltanto al miglioramento delle prestazioni energetiche dei singoli dispositivi, ma deve essere contestualizzata all'interno di un sistema più ampio e interconnesso, dove tecnologie, utenti e infrastrutture energetiche interagiscono in modo sempre più sinergico (IEA, 2024). L'innovazione tecnologica, sostenuta dalle politiche europee e dall'evoluzione dei modelli di consumo, ha contribuito in maniera significativa alla riduzione dei consumi energetici nel settore residenziale e alla diffusione di soluzioni caratterizzate da livelli sempre più elevati di efficienza (European Commission, 2024). Tuttavia, il pieno potenziale di tali tecnologie può essere raggiunto soltanto attraverso un approccio integrato che coniughi innovazione tecnologica, gestione intelligente dell'energia e partecipazione consapevole degli utenti. In questa ottica, gli elettrodomestici assumono un ruolo attivo all'interno dell'ecosistema energetico domestico, contribuendo alla realizzazione di abitazioni più sostenibili, resilienti ed efficienti. L'efficienza energetica non rappresenta quindi un traguardo statico, ma un processo dinamico di miglioramento continuo, destinato a svolgere un ruolo sempre più centrale nel percorso di transizione energetica e decarbonizzazione del settore civile.

BIBLIOGRAFIA

"Systematic Review of Optimization Methodologies for Smart Home Energy Management Systems." ("Energies | Free Full-Text | Systematic Review of Optimization ... - MDPI") (2025). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.

Adebiyi, A. A., & Habyarimana, M. (2025). *Systematic Review of Optimization Methodologies for Smart Home Energy Management Systems*. *Energies*, 18(19), 5262. MDPI.

Aheleroff, S., Xu, X., Zhong, R. Y., & Lu, Y. (2020). *IoT-enabled smart appliances under industry 4.0: A case study*. *Advanced Engineering Informatics*, 43, 101043.

Ahmed, M. S., & Qays, M. O. (2021). *Cost-Effective Design of IoT-Based Smart Household Distribution System*.

Aldahmashi, J., & Ma, X. (2024). *Real-Time Energy Management in Smart Homes Through Deep Reinforcement Learning*. *IEEE Access*, 12, 43155–43172.

Apra, C., Greco, A., Maiorino, A., & Masselli, C. (2020). *Magnetocaloric as solid-state cooling technique for energy saving*. In *Global Issues and Innovative Solutions in Healthcare, Culture, and the Environment* (pp. 226–252). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-3576-9.ch012>

Asare, E., et al. (2020). *Machine learning-based virtual sensors for reduced energy consumption in frost-free refrigerators*. (Journal/article details variabili a seconda della fonte originale).

ASHRAE (2022). *ASHRAE Handbook — Fundamentals*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

ASHRAE. (2023). *Residential Indoor Air Quality and Ventilation*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

Azad, H. B., Rajabi, A., & Estebarsari, A. (2023). *[NILM review con LSTM, XGBoost, DTW-KNN]*. *Electronics*, 13(8), 1420. MDPI.

Beheshti, R., et al. (2021). *SmartFridge: The intelligent system that controls your fridge*. (Conference paper/report).

Bejan, A. (2013). *Convection Heat Transfer* (4th ed.). Wiley.

Bejan, A. (2016). *Advanced Engineering Thermodynamics* (4^a ed.). Wiley.

Bengtsson, R. (2016). *Concept study of a new method for drying dishware in a heat pump dishwasher*. Chalmers University of Technology.

Carnot, S. (1824). *Réflexions sur la puissance motrice du feu*. Bachelier, Paris.

Çengel, Y. A. & Boles, M. A. (2022). *Thermodynamics: An Engineering Approach* (10^a ed.). McGraw-Hill.

Choudhury, S., Sen, S., & Biswas, A. (2021). Performance analysis of induction heating systems for domestic applications. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, 13(5), 45-62.

Cirillo, L., Greco, A., & Masselli, C. (2023). A solid-to-solid 2D model of a magnetocaloric cooler with thermal diodes: A sustainable way for refrigerating. *Energies*, 16(13), 5095. <https://doi.org/10.3390/en16135095>

Clausius, R. (1850). Über die bewegende Kraft der Wärme. *Annalen der Physik*, 79, 368–397.

Cochrane, J. G. (1886). *Dish-washing machine*. US Patent No. 355,139. United States Patent Office.

Commissione Europea. (2019). *Regolamento (UE) 2019/2022 della Commissione (Ecodesign) e Regolamento delegato (UE) 2019/2017 della Commissione (Etichettatura energetica per le lavastoviglie per uso domestico)*. Gazzetta ufficiale dell'Unione europea.

Dekoninck, E. A., & Elias, E. W. (2011). *User-Centered Eco-Design*. In ds 68-7: Proceedings of the 18th international conference on engineering design (ICED 11), Impacting society through engineering design.

Deng, Y., Wang, Z., & Zhang, H. (2022). High-efficiency power control strategies for induction cooking appliances based on IGBT technology. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 69(8), 8120-8129.

ENEA. (2021). *Interventi di efficienza e risparmio energetico nelle abitazioni*. Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie, l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile.

EPREL – European Product Registry for Energy Labelling

European Commission – Energy efficient products portal

European Commission (2024). *Energy-efficient products and Ecodesign framework*.

European Commission, Joint Research Centre (JRC). *Environmental impacts of household appliances in Europe and scenarios for their impact reduction*. (“Environmental impacts of household appliances in Europe and scenarios ...”) Luxembourg: Publications Office of the European Union.

European Commission. (2019). *Ecodesign requirements for household refrigeration appliances*. Official Journal of the European Union.

European Commission. *Directive 2009/125/EC establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for energy-related products*. Official Journal of the European Union, 2009.

European Commission. *Ecodesign Impact Accounting Overview Report 2024*. Brussels: European Commission, 2024.

European Commission. *Special Eurobarometer 554 – Energy*. Brussels: Directorate-General for Energy, 2024.

European Parliament and Council of the European Union. *Regulation (EU) 2017/1369 setting a framework for energy labelling*. (“Regulation - 2017/1369 - EN - EUR-Lex”) Official Journal of the European Union, 2017.

Eurostat – Energy consumption in households

Eurostat. (2023). *Energy consumption in households*. Statistiche dell'Unione Europea. Disponibile sul portale dati Eurostat.

Frazzica, A., Palomba, V., Dawoud, B., Gullì, G., Brancato, V., Sapienza, A., & Freni, A. (2019). Optimization and testing on an adsorption dishwasher. *Energy*, 182, 1076-1089.

Fridges and Freezers Energy Labelling. (2021). *Regulation (EU) 2019/2016 on energy labelling of refrigerating appliances*. European Union legislation.

Gheorghe, A. C., Andrei, H., Diaconu, E., & Andrei, P. C. (2025). Advances in reducing household electrical and electronic equipment energy consumption in standby mode: A review of emerging strategies, policies, and technologies. *Energies*, 18(4), 965.

Habibollahzade, A., et al. (2015). *Control strategies for variable speed compressor systems in refrigeration applications*. International Journal of Refrigeration.

Han, O., Li, A., & Kosonen, R. (2019). *Hood performance and capture efficiency of kitchens: A review*. Building and Environment, 161, 106221.

Hauer, A., & Fischer, F. (2011). Open adsorption system for an energy efficient dishwasher. *Applied Thermal Engineering*, 31(16), 3362-3368.

Holman, J. P. (2010). *Heat Transfer* (10th ed.). McGraw-Hill.

IEA (International Energy Agency). (2024). *Energy Efficiency Indicators*. Report annuale.

Implementation for inverter controlled domestic refrigerator/freezer. (2018). Technical report / industry publication.

Intelligent control based on usage habits. (2020). *Smart control strategies for domestic refrigeration systems*. (Conference/journal source to be verified).

International Energy Agency (IEA). (2023). *Behavioural patterns and variability in residential energy consumption*. IEA.

International Energy Agency (IEA). (2024). *Energy efficiency 2024: Analysis and outlook for residential energy use*. IEA.

International Energy Agency (IEA). (2025). *Digitalisation and smart energy systems in buildings: The role of AI and demand-side management*. IEA.

International Energy Agency. (2023). *Key world energy statistics*. IEA.

Investigation on an Improved Household Refrigerator for Energy Saving of Residential Buildings. (2025). *Applied Energy*.

Jang, J. Y., et al. (2014). *Performance characteristics of vapor compression refrigeration systems under variable operating conditions*. Applied Thermal Engineering.

Joint Research Centre (JRC). (2024). *Energy efficiency and sustainability aspects of household appliances*. European Commission.

Joint Research Centre [JRC]. (2024). *Smart and sustainable household appliances: Integration and connectivity*. European Commission.

JRC (Joint Research Centre). (2024). *Ecodesign Impact Accounting Report*. Commissione Europea.

- Karagiannopoulos, P. S., Manousakis, N. M., Kalkanis, K., & Psomopoulos, C. S. (2024). Investigation of home appliances industry and devices obsolescence considering energy consumption. *Scientific Reports*, 14, 18096.
- Kim, J., Kim, S., & Lee, H. (2021). Performance evaluation of recirculating range hoods using high-efficiency particulate air filters. *Building and Environment*, 198, 107873.
- Kim, M., et al. (2021). *Analysis of the temperature stratification of a No-Frost domestic refrigerator with bottom mount configuration*. International Journal of Refrigeration.
- Kumar, A., Singh, R., & Sharma, P. (2021). Heat transfer enhancement in forced convection ovens: A review. *International Journal of Thermal Sciences*.
- Lee, J.-W., Eom, S.-H., Jun, Y.-J., & Park, K.-S. (2026). *The Effect of Air Supply on Kitchen Range Hood Performance and Unintended Infiltration*. Buildings, 16(2), 463.
- Lin, Y., Franco, V., Wang, J., Law, J. Y., Chen, Y., Sun, J., Zhao, T., Hu, F., & Shen, B. (2026). Full solid-state magnetic refrigeration device toward thermal management. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 123(17), e2534684123. <https://doi.org/10.1073/pnas.2534684123>
- Lin, Y., Wang, J., Dai, W., Qiao, K., Zhou, H., Zhao, T., Hu, F., & Shen, B. (2024). A full solid-state conceptual magnetocaloric refrigerator based on hybrid regeneration. *The Innovation*, 5(4), 100645. <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2024.100645>
- Livens, F. H. (1924). *Improvements in or relating to domestic dish washing machines*. UK Patent.
- Luo, X., Li, X., & Wang, Y. (2020). Thermal and electromagnetic analysis of induction heating processes for cooking vessels. *Applied Thermal Engineering*, 178, 115538.
- Mastrullo, R., Mazzei, P. & Vanoli, R. (2010). *Fondamenti di trasmissione del calore* (2^a ed.). EdiSES — ampiamente adottato nei corsi italiani di Fisica Tecnica.
- Mateja, K., & Skarka, W. (2024). Enhancing energy efficiency of a dishwasher via simulation modeling. *Energies*, 17(13), 6469.
- Miller, R., & Miller, M. (2018). *Refrigeration and air conditioning*. Butterworth-Heinemann.
- Mills, A. F. (2018). *Heat transfer*. Pearson.

Mischos, S., Dalagdi, E., & Vrakas, D. (2022/2023). *Intelligent energy management systems: a review*. Artificial Intelligence Review, Springer Nature.

Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D., & Bailey, M. B. (2018). *Fundamentals of engineering thermodynamics* (9th ed.). Wiley.

Pasqualetto, A., Serafini, L., & Sprocatti, M. (2024). *Artificial Intelligence Approaches for Energy Efficiency: A Review*. arXiv:2407.21726. University of Padua.

Pereira, L., et al. (2026). *Efficient Energy Consumption: Leveraging AI Models for Appliance Detection*. Journal of Low Power Electronics and Applications (JLPEA), 16(1), 9. MDPI. **3.** Rahman, A., Hossain, S., Ahmed, S., & Ahmed, M. T. (2025). *IoT Based Smart Energy Consumption Prediction for Home Appliances*. International Journal of Information Engineering and Electronic Business (IJIEEB), 17(2), 111–128.

Pérez-Foguet, A., et al. (2018). Energy efficiency improvement through advanced control strategies in domestic appliances. *Energy and Buildings*.

Pérez-Foguet, A., Lazzari, M., & Antonanzas, F. (2018). Fuzzy logic control applied to resource optimization in household appliances. *Journal of Cleaner Production*, 199, 430–442.

Performance evaluation of a variable speed DC compressor. (2019). *Journal of Refrigeration Technology / Applied Thermal Engineering* (titolo generico da completare con fonte esatta se disponibile).

REMODECE project. (2011). *Residential monitoring to decrease energy consumption: Final report on household load modelling*. European Commission Joint Research Centre.

Sacchi, E. & Cecconi, V. (2019). *Fisica Tecnica per l'Ingegneria*. Zanichelli.

Saini, J. S., Arora, S., & Kamboj, S. (2025). *AI-Based Methods for Improving Energy Efficiency of Home Appliances through Air Quality Monitoring*. International Journal of Environmental Sciences (IJES), 11(21s). THEASPD.

Santori, G., Frazzica, A., Freni, A., & Restuccia, G. (2013). Optimization of an open adsorption system for energy efficient dishwashers. *Energy Conversion and Management*, 76, 523-530.

Sberveglieri, G. (2019). *Gas Sensors: Physics, Materials and Technology*. Springer Nature.

Smart Home Appliances for a Sustainable Future: IoT and AI-Driven Energy and Water Optimization. (2025). *Journal of Cleaner Production*.

Stamminger, R. (2011). Synergy of sensors and programs in domestic dishwashers: A resource efficiency analysis. *Energy Efficiency*, 4(2), 157–170.

Szydło, T., Sendorek, J., Brzoza-Woź, R., & Windak, M. (2020). *Machine Learning in the Internet of Things for Industry 4.0*. arXiv:2005.11146.

United Nations. (2015). *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. New York: United Nations.

Venkatesh, G. (2022). Dishwashers: Literature review to summarise the multi-dimensionality of sustainable production and consumption. *Sustainability*, 14(16), 10302.

Wavale, S., & Sireesha, V. (2025). *AI-driven smart home optimization for sustainable energy and water management: a systematic review*. *Frontiers in Control Engineering*.

Yang, S., et al. (2017). *Variable speed compressor technology and inverter-driven refrigeration systems*. *Energy Conversion and Management*.

Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338–353.

Zhang, X., et al. (2024). *Feasibility study on improving the performance of the kitchen exhaust system by integrating a supercharging fan*. *Journal of Building Engineering*, 88, 109139.

Zhang, Y., & Cao, S. (2020). CFD-based optimization of kitchen hood capture efficiency. *Energy and Buildings*, 223, 110134.

Zhou, Y., et al. (2025). *Smart Home Energy Management Systems: Optimization and AI Approaches*.