RdS
RICERCA DI SISTEMA

ENEA
AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE, L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

MINISTERO DELL'AMBIENTE E DELLA SICUREZZA ENERGETICA

Ricerca di Sistema elettrico

LA 4.14: Diffusione delle PdC: Sviluppo di modello digitale di pompe di calore elettriche per fini di diagnostica e valutazione dei guasti

Alfonso William Mauro, Rita Mastrullo

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

RdS_PTR22-24_PR1.7_ LA4.14_034

LA 4.14: DIFFUSIONE DELLE PDC: SVILUPPO DI MODELLO DIGITALE DI POMPE DI CALORE ELETTRICHE PER FINI DI DIAGNOSTICA E VALUTAZIONE DEI GUASTI

Alfonso William Mauro, Rita Mastrullo

Giugno 2023

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica - ENEA
Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: *Decarbonizzazione/Digitalizzazione ed evoluzione delle reti*
Progetto: Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali
Linea di attività: 4.14
Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA
Responsabile Linea di Attività: Università degli Studi di Napoli Federico II - Dipartimento di Ingegneria Industriale
Mese inizio previsto: gennaio 2022
Mese inizio effettivo: gennaio 2022
Mese fine previsto: giugno 2023
Mese fine effettivo: giugno 2023

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "*Sviluppo di modelli digitali e machine learning per fini di diagnostica e valutazione dei guasti delle pompe di calore*"
Responsabile scientifico ENEA: Ing. Raniero Trinchieri
Responsabile scientifico Co-beneficiario: Prof. Alfonso William Mauro

Indice

1 RISULTATI ATTESI 3

2 RISULTATI OTTENUTI 4

3 PRODOTTI ATTESI 6

4 PRODOTTI SVILUPPATI 7

5 ANALISI DEGLI SCOSTAMENTI SU ATTIVITÀ E RISULTATI 8

6 SINTESI DELLE ATTIVITÀ SVOLTE 9

7 DETTAGLIO DELLE ATTIVITÀ SVOLTE 10

8 CONTRIBUTO DELLE EVENTUALI CONSULENZE ALLE ATTIVITÀ SOPRA DESCRITTE 48

9 PUBBLICAZIONI SCIENTIFICHE 49

10 EVENTI DI DISSEMINAZIONE 50

1 Risultati attesi

L'attività proposta dal Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Napoli Federico II (UNINA) nella LA 4.14 riguarda il settore delle pompe di calore per la climatizzazione. Tali applicazioni rappresentano circa il 20% dei consumi energetici complessivi di un edificio residenziale e quindi un contributo significativo nell'ambito delle politiche di decarbonizzazione e di riduzione dei consumi di energia. In questo scenario, l'occorrenza di guasti lievi (come, ad esempio, lo sporcamento degli scambiatori o le perdite di refrigerante), che non risultano di facile identificazione, portano ad una graduale diminuzione delle performance della macchina nel tempo. In uno scenario di elevata diffusione della tecnologia, è estremamente importante riuscire a caratterizzare l'effetto di ogni possibile malfunzionamento sulle performance della macchina, e valutare quale sia la strategia di manutenzione più efficace in termini economici/termodinamici ed in termini ambientali.
Nel dettaglio, nella presente LA, UNINA si occuperà della definizione di un modello per la simulazione di pompe di calore ad uso domestico, in condizioni ordinarie e di guasto, tramite la calibrazione modelli ad-hoc creati per i singoli componenti, basati su equazioni fenomenologiche e su performance reali prelevate da cataloghi di costruttori, considerando la migliore tecnologia ("best technology") attualmente esistente. Tramite i modelli sviluppati sarà quindi possibile valutare la degradazione di efficienza nel tempo in seguito all'evoluzione dei summenzionati guasti, ed analizzare differenti scenari di gestione delle operazioni di manutenzione, al fine di prevederne l'approccio più conveniente dal punto di vista economico ed ambientale. Tale analisi andrà effettuata per differenti zone climatiche tipiche del panorama italiano (Courmayeur, Milano, Roma, Palermo e Pantelleria).
In definitiva, la lista di attività e risultati previsti per la LA 4.14 da parte di UNINA è la seguente:

- Attività a1. Sviluppo di un modello (o codice di calcolo) per la simulazione di pompe di calore ad uso domestico e calibrazione dei modelli per singoli componenti.
- Attività a2. Simulazioni del funzionamento di una pompa di calore in modalità raffrescamento, con analisi sull'effetto di guasti lievi sul ciclo termodinamico, sulle performance attuali e stagionali, nei diversi climi di riferimento prima indicati, analizzando diversi scenari di manutenzione programmata e non programmata.
- Attività a3. Simulazioni del funzionamento di una pompa di calore in modalità heating + cooling, con analisi sull'effetto di guasti lievi sul ciclo termodinamico, sulle performance attuali e stagionali, nei diversi climi di riferimento prima indicati, analizzando diversi scenari di manutenzione programmata e non programmata.

2 Risultati ottenuti

I risultati ottenuti da UNINA per la LA 4.14 sono in linea con quanto dichiarato nel capitolato. In particolare, dai risultati si possono evincere delle indicazioni quantitative sul vantaggio ottenibile sulle prestazioni stagionali di pompe di calore (SCOP) operanti in modalità solo cooling o reversibile (heating + cooling) nel caso di scenari di manutenzioni programmate, rispetto al caso in cui la manutenzione prende luogo soltanto quando la macchina non è in grado più di erogare il servizio richiesto dall'utente finale, a seconda della condizione climatica considerata. Una più alta prestazione del parco delle macchine istallate consente di raggiungere un maggior risparmio di energia elettrica a parità di servizio come beneficio per il sistema elettrico nazionale, ed un risparmio in termini di costi di esercizio in bolletta per i suoi utenti. I risultati ottenuti sono riportati nel dettaglio nelle sezioni sottostanti.

2.1 Attività a1. Sviluppo di un modello per la simulazione di pompe di calore ad uso domestico e calibrazione dei modelli per singoli componenti

Viene sviluppato un modello digitale per la simulazione di una pompa di calore domestica aria-aria, di taglia 6.3 kW di raffrescamento (con aria esterna a 35 °C e aria interna lato utente a 27 °C) e 5.8 kW di riscaldamento (con aria esterna a 7 °C e aria interna lato utente a 20 °C). È stata effettuata una calibrazione ad HOC per i modelli dei singoli componenti ottenendo per il compressore un errore medio assoluto percentuale (MAPE) del 2.4% sul rendimento globale e dell'1.4% sul rendimento volumetrico, e per la valvola un MAPE del 10%. Per gli scambiatori di sono state utilizzate correlazioni ben note ed utilizzate in letteratura. Sono stati considerati i tre guasti di sporcamento condensatore, sporcamento evaporatore e perdita di refrigerante, ritenuti tra tutti i guasti lievi presenti su questa tipologia di macchine come quelli in grado di impattare maggiormente sulle performance e sui consumi se rimangono non identificati per lungo tempo. Quest'ultimi sono stati modellati attraverso relazioni fenomenologiche che tengono conto della natura fisica del singolo guasto.

2.2 Attività a2. Simulazioni del funzionamento di una pompa di calore in modalità raffrescamento, con analisi sull'effetto di guasti lievi sul ciclo termodinamico, sulle performance attuali e stagionali

La pompa di calore modellata è stata simulata in modalità raffrescamento nei climi indicati nel capitolato (tranne che per Courmayeur dove si è ritenuta assente l'esigenza di raffrescamento). Sono state ottenute delle mappe di resa frigorifera e COP in funzione dell'intensità del guasto, e della temperatura ambiente, ottenendo una maggiore penalizzazione in caso di perdita di refrigerante, e prestazioni pressoché simili per gli scambiatori di calore. Successivamente sono stati simulati diversi scenari di evoluzione dell'intensità di guasto nel tempo, per un periodo di durata pari a 12 anni (tipica vita utile per questa tipologia di macchine), con diversi scenari di manutenzione non programmata, ordinaria ogni 4,2 e 1 anni. Si è ottenuto che, tra tutti gli scenari di guasto simulati, circa l'80% su tutti i climi presenta una penalizzazione sulle prestazioni stagionali (SCOP) superiore al 15% in caso di manutenzione non programmata (che avviene soltanto quando la macchina non è in grado più di fornire un servizio soddisfacente all'utente), e che questa percentuale può essere annullata nel caso di una manutenzione ordinaria ogni 2 anni.

2.3 Attività a3. Simulazioni del funzionamento di una pompa di calore in modalità riscaldamento e raffrescamento, con analisi sull'effetto di guasti lievi sul ciclo termodinamico, sulle performance attuali e stagionali

Viene eseguita un'analisi simile anche sulla pompa di calore operante in modalità reversibile riscaldamento più raffrescamento. Le mappe di performance ottenute per la modalità riscaldamento mostrano come l'effetto sulle performance dello sporcamento all'evaporatore sono quasi trascurabili rispetto a quelle ottenute per la modalità raffrescamento dato che l'unità esterna, utilizzata come condensatore in modalità cooling, risulta sovradimensionata se usata come evaporatore in modalità heating. Gli effetti di sporcamento

condensatore invece sono pressoché simili tra le modalità heating e cooling, mentre anche la perdita di refrigerante ha un effetto minore a causa di una minore carica richiesta nella modalità heating, a causa di minori pressioni e densità del ciclo rispetto alla modalità cooling. Infine, le simulazioni stagionali nei climi di riferimento (in cui rispetto a prima viene considerato anche il clima di Courmayeur), effettuate in modo analogo alla sola modalità heating, mostrano una diminuzione degli scenari penalizzati con l'aumento della frequenza delle operazioni di manutenzione, con un effetto maggiore specialmente per i climi più caldi.

3 Prodotti attesi

Per la LA 4.14 non è previsto l'ottenimento di nessun prodotto hardware/software. Il principale prodotto atteso dalla presente LA è un report contenente la descrizione dettagliata dei risultati ottenuti.

4 Prodotti sviluppati

Per la LA 4.14 non è stato sviluppato nessun prodotto hardware/software. È stato realizzato il presente report, contenente il dettaglio degli studi effettuati, come prodotto dell'attività.

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Per le attività svolte non è presenta alcuno scostamento tecnico/economico rispetto al preventivo. Non è stata evidenziata alcuna criticità rispetto al piano di rischi presentato

6 Sintesi delle attività svolte

Si riporta nella seguente lista una sintesi delle attività svolte e dei risultati ottenuti nell'ambito della LA 4.14, in relazione ai risultati attesi.

1) Sviluppo di un modello digitale di pompa di calore domestica aria/aria in **condizioni di funzionamento standard ed in presenza di guasti lievi** (perdite di refrigerante, sporcamento per unità interna ed esterna)

2) Simulazioni nel caso di funzionamento solo estivo (solo cooling) ed estivo e invernale (heating + cooling) in **5 climi di riferimento italiani** (Courmayeur, Milano, Roma, Palermo, Pantelleria)

3) Risultati (**resa, COP, consumi energetici ed emissioni ambientali**) in condizioni attuali e stagionali nei diversi climi considerati, per diversi scenari **di occorrenza e severità dei faults, al variare della strategia di manutenzione se non organizzata** (non presente fino all'ottenimento del guasto grave) **o ordinaria** (reset delle condizioni standard cadenzata).

7 Dettaglio delle attività svolte

In questa sezione viene fornita una descrizione dettagliata delle attività svolte e risultati ottenuti nella LA 4.14. I risultati sono stati ottenuti tramite un digital model, i cui principi ed equazioni principali sono presentati nella sezione 7.1. La sezione 7.2 presenta tutti i dati, ipotesi e condizioni operative relativi alla macchina analizzata come caso studio e alle simulazioni dinamiche. Infine, i risultati per le due modalità (solo estiva e estiva + invernale) sono riportati rispettivamente nelle sezioni 7.3 e 7.4.

L'attività riprende diversi approcci comunemente utilizzati nell'ambito della letteratura (Navarro-Peris et al. [1] [2], Yuill et al. [3], Brown et al. [4] [5]) e già applicati dal nostro gruppo di ricerca in lavori precedenti (Mauro et al. [6] [7] [8]). Rispetto ai lavori precedenti, nell'ambito del progetto il dimensionamento del sistema è stato effettuato individuando una componentistica unica dei componenti non presente in letteratura, una calibrazione dedicata e una specifica analisi di scenari di guasto.

7.1 Modellazione

7.1.1 Schema di impianto

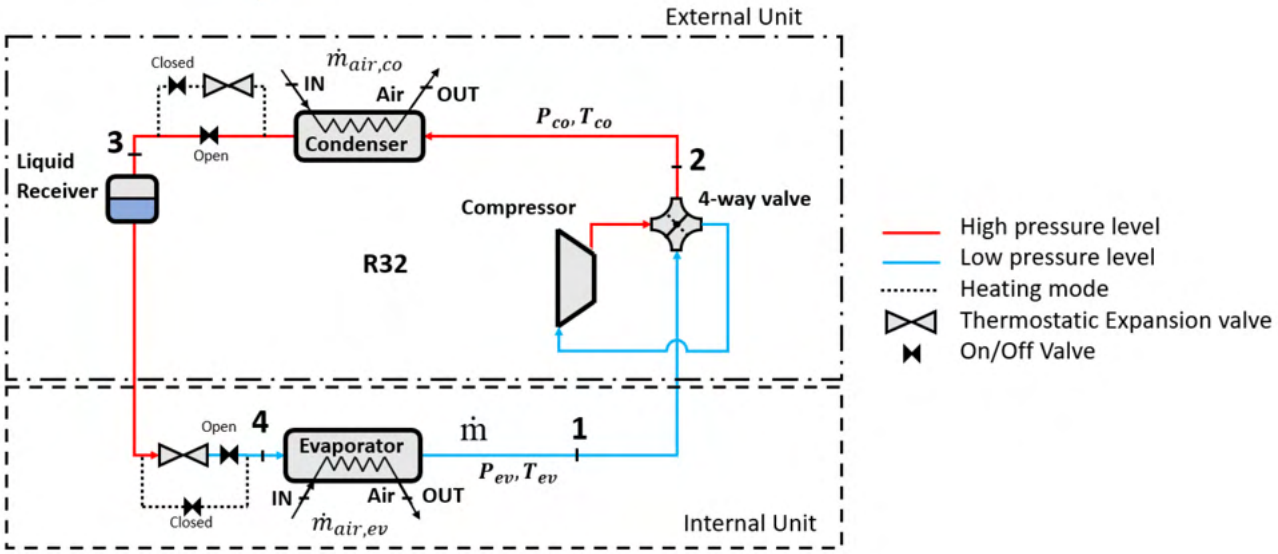

Fig. 1 – Schema di impianto

In Fig. 1 è mostrato lo schema di impianto della pompa di calore reversibile modellata, riferita alla modalità cooling. Il sistema è composto da un compressore scroll, una valvola a 4 vie, due scambiatori di calore ad aria (batterie alettate) usati come evaporatore e condensatore, un ricevitore di liquido e due valvole termostatiche rispettivamente per le modalità heating e cooling.

7.1.2 Modellazione componenti

Per il compressore, si considerano le seguenti due espressioni per la valutazione di portata massica elaborata ($\dot{m}_{comp}$) e potenza elettrica assorbita dal compressore ($\dot{W}_{el}$) in funzione delle condizioni operative.

$$\dot{m}_{comp} = \rho_{in} \cdot \eta_v \cdot \frac{n}{60} \cdot Cilindrata$$

$$\dot{W}_{el} = \frac{\dot{m}_{comp} \cdot (h_{out,comp,is} - h_{in,comp})}{\eta_g}$$

$\rho_{in}, h_{in,comp}, n, h_{out,comp,is}$ sono rispettivamente la densità e l'entalpia all'aspirazione, il numero di giri e l'entalpia ideale alla mandata del compressore. η_v e η_g sono i rendimenti volumetrico e globale del compressore.

Per la valvola, si considera un'espressione per la valutazione di portata elaborata dalla valvola ($\dot{m}_{valve}$) in funzione delle condizioni operative.

$$\dot{m}_{valve} = \xi \cdot \rho_{in} \cdot K_1 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \bar{v}_{in-out,s} \cdot (\rho_{in} - \rho_{out})}{\left(\frac{\rho_{in}^2}{\rho_{out,is}^2} \cdot K_2 - 1\right)}}$$

ξ, ρ_{in}, ρ_{out} sono rispettivamente la percentuale di apertura e le densità all'aspirazione e alla mandata della valvola, mentre $\bar{v}_{in-out,s}$ è il volume specifico medio valutato lungo l'isentropica. K_1 e K_2 sono costanti da calibrare su dati sperimentali. Per gli scambiatori di calore (batterie alettate), viene adottato un approccio modellistico 2D. Viene effettuata una discretizzazione del componente, e per ciascun elemento valutata la conduttanza globale di scambio termico (dUA), con la seguente relazione:

$$dUA = \frac{1}{dR_{c,int} + dR_k + dR_{c,ext}}$$

$dR_{c,int}, dR_k, dR_{c,ext}$ sono rispettivamente le resistenze termiche convettiva interna, conduttiva e convettiva esterna. La caratterizzazione geometrica dei componenti viene effettuata secondo quando indicato da Shah and Sekulic (2003), mentre per la caratterizzazione dello scambio termico e delle perdite di carico sono state utilizzate le correlazioni empiriche indicate in Tab. 1..

Tab. 1 – Correlazioni utilizzate per la determinazione del coefficiente di scambio termico e delle perdite di carico negli scambiatori di calore

Parametro valutato	**Fluido**	**Correlazione**
Coefficiente di scambio termico	R32 (Flow Boiling)	Gungor and Winterton (1986)
	R32 (Flow Condensation)	Shah (1979)
	R32 (Vapore Surriscaldato)	Dittus and Boelter (1930)
	Aria	Wang and Chi (2000)
Perdite di carico	R32	Trascurate
	Aria	Wang and Chi (2000)
Geometria scambiatori	/	Shah and Sekulic (2003)
Efficienza pacco alettato	/	Schmidt (1949)

Per i ventilatori degli scambiatori di calore, sono state considerate delle curve di prestazione nominali da cataloghi di costruttori, ipotizzando un ventilatore assiale per l'unità interna e un ventilatore tangenziale per l'unità esterna. Viene risolto l'accoppiamento con le curve caratteristiche del circuito degli scambiatori per i valori effettivi di portata volumetrica di aria, così come mostrato nella Figura 1.

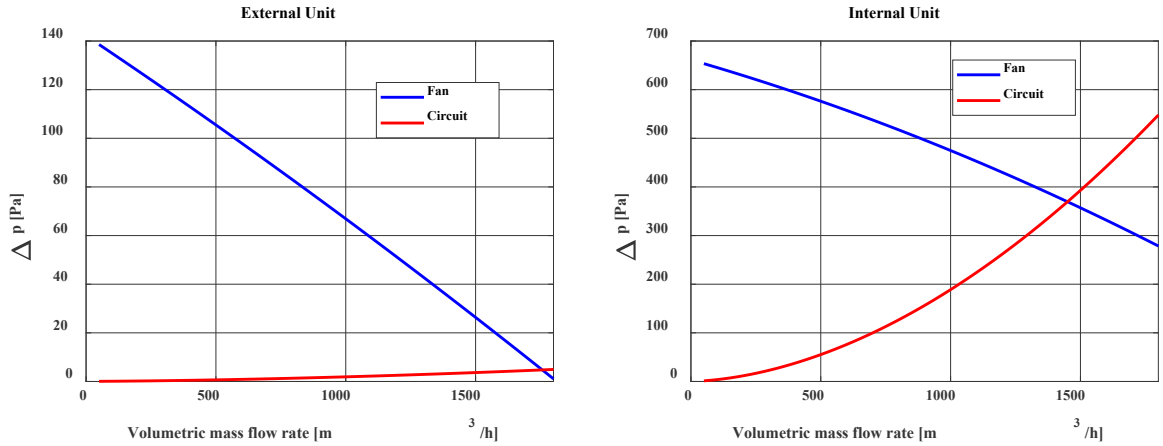

Fig. 2 – Accoppiamento curva circuito/fan per la determinazione della portata volumetrica. Unità esterna (sx) ed unità interna (dx)

Per la valutazione della carica di refrigerante richiesta dal sistema (m_{tot}), al variare delle condizioni operative, vengono considerati i contributi monofase della linea di liquido e monofase/bifase dei due scambiatori di calore nei tratti di condensazione, evaporazione, surriscaldamento e de-surriscaldamento. Vengono trascurati invece i contributi delle linee di aspirazione e mandata del compressore. Tutti i contributi sono valutati con le formule seguenti.

$$m_{tot} = m_{sf} + m_{tp}$$
$$dm_{sp} = \rho \cdot S \cdot dz \quad \rightarrow Monofase$$
$$dm_{tp} = S \cdot [\rho_L(1-\alpha) + \rho_v \alpha] \cdot dz \quad \rightarrow Bifase$$

m_{sf} *e* m_{tp} sono le cariche totali rispettivamente in fase singola e in bifase, ρ_L *e* ρ_v le densità della fase liquida e vapore, mentre S è la superficie trasversale dei condotti. La void fraction (α) è stata valutata con correlazione di Rouhani and Axelsson (1970).

7.1.3 Modellazione guasti

Per la modellazione della perdita di refrigerante, questa viene a priori assegnata considerando la seguente definizione di intensità di guasto (FI).

$$FI_{leak} = \frac{m_{nominal} - m_{actual}}{m_{nominal}} \cdot 100$$

In particolare, nel caso in cui la perdita è tale che la carica disponibile dell'impianto è inferiore rispetto alla carica necessaria (valutata con le relazioni precedenti), il ricevitore di liquido è considerato vuoto e la valvola di laminazione alimentata con vapore saturo. Quest'ultima diventa non in grado di controllare il surriscaldamento che aumenta in modo incontrollato, con tutte le conseguenze che questo causa (riduzione portata elaborata, resa, COP).

Per quanto riguarda lo sporcamento degli scambiatori di calore (vedi Fig. 2), per l'unità esterna si assegna una penalizzazione sulla superficie di free-flow di passaggio dell'aria attraverso lo scambiatore ($S_{free-flow}$), che si ripercuote con la stessa entità come penalizzazione della superficie di scambio termico (S_{ht}, a causa di porzioni dello scambiatore bloccate dalla polvere). Per l'unità interna si considera una penalizzazione della portata volumetrica ($\dot{V}_{free-flow}$), dato che l'accumulo di polvere avviene prevalentemente sul filtro installato.

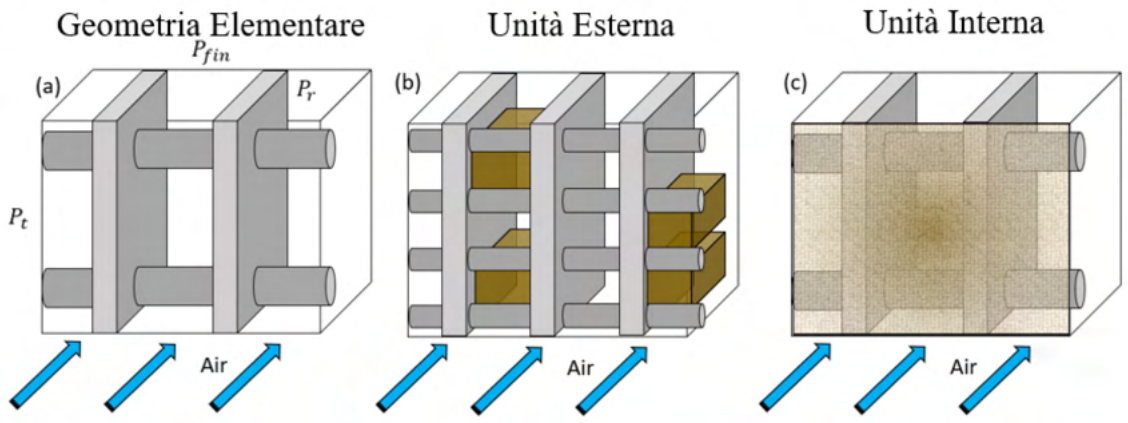

Fig. 3 – Logica di gestione dello sporcamento per l'unità interna e per l'unità esterna

Sono quindi considerate le seguenti definizioni di intensità di guasto (FI) per lo sporcamento.

$$FI_{foul,ext} = \frac{S_{free-flow,foul}}{S_{free-flow,clean}} \cdot 100 = \frac{S_{ht,foul}}{S_{ht,clean}} \cdot 100$$

$$FI_{foul,int} = \frac{\dot{V}_{free-flow,foul}}{\dot{V}_{free-flow,clean}} \cdot 100$$

7.1.4 Calibrazione componenti

Una calibrazione dedicata dei modelli su dati di catalogo dei componenti è stata effettuata per condurre l'analisi riportata in questo report.

Per il compressore, i rendimenti volumetrico (η_v) e globale (η_g) sono stati calibrati da cataloghi di costruttori in funzione del rapporto di compressione, considerando una best technology per il componente considerato. I risultati della calibrazione sono riportati in Fig. 4:

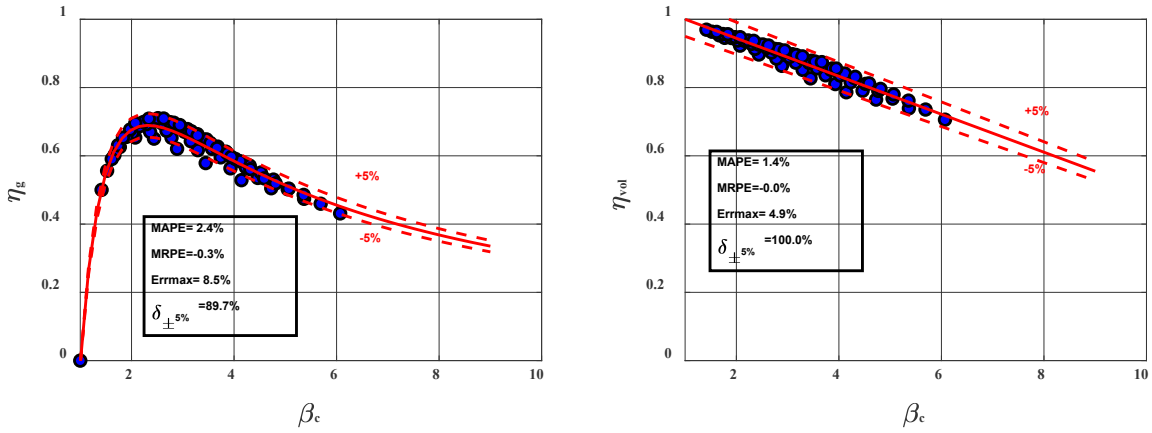

Fig. 4 – Curve calibrate del rendimento globale (sx) e volumetrico (dx) del compressore in funzione del rapporto di compressione

Per la valvola invece, le costanti K_1 e K_2 sono anche state calibrate su dati di cataloghi. Il risultato della calibrazione è riportato nella Fig. 5.

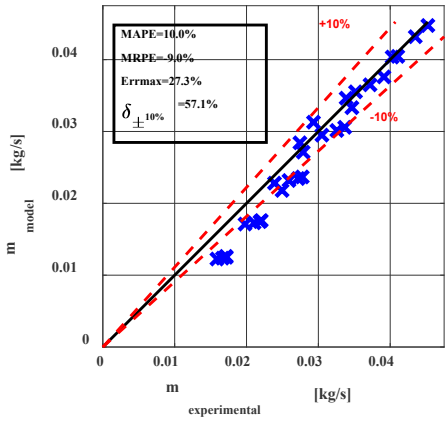

Fig. 5 – Confronto tra la portata elaborata dalla valvola di laminazione valutata tramite catalogo e tramite modello calibrato

7.1.5 Algoritmo risolutivo

In Fig. 6 sono riportati i vari step seguiti come algoritmo risolutivo per l'accoppiamento sei singoli sotto-modelli e la simulazione dell'intero sistema

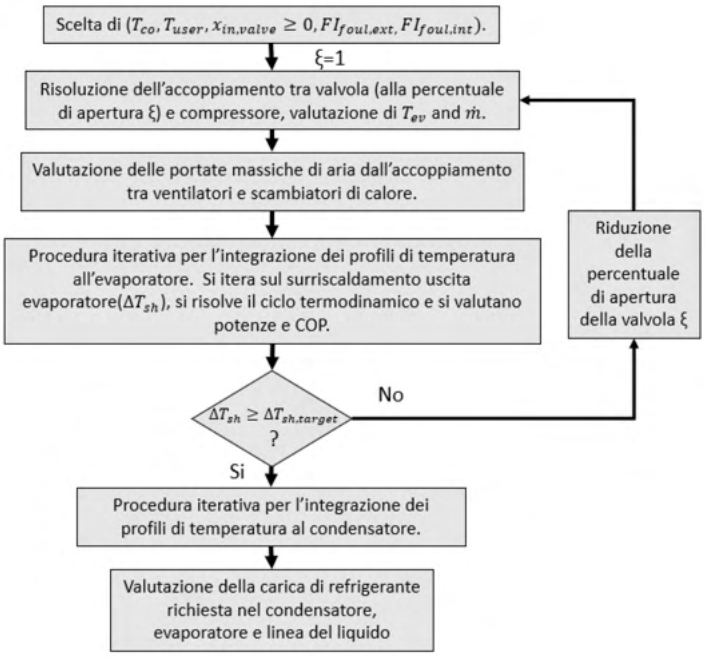

Fig. 6 – Algoritmo risolutivo per l'accoppiamento dei singoli sottomodelli

7.2 Dati del caso studio analizzato e dell'utenza considerata

7.2.1 Dati nominali della macchina

In Tab. 2 e Tab. 3 sono indicati tutti i parametri nominali della macchina oggetto dello studio e i dati geometrici relativi all'unità esterna e interna.

Tab. 2 – Parametri nominali della macchina oggetto di studio

Parametro	Valore
Potenza di Raffrescamento (27-35 °C) [kW]	6.28
COP Raffrescamento(27-35°C) [-]	3.62
Potenza di Riscaldamento (7-20 °C) [kW]	5.82
COP Riscaldamento (7-20°C) [-]	4.57
Fluido Refrigerante	R32
Surriscaldamento uscita evaporatore nominale(°C)	7.0
Lunghezza della linea del liquido (m)	0.5
Carica di refrigerante nominale (g)	1020
Portata volumetrica compressore Raffrescamento (27-35°C) [m3/h]	3.37
Portata volumetrica compressore Riscaldamento (27-35°C) [m3/h]	3.32

Tab. 3 – Dati geometrici assegnati per gli scambiatori di calore aria-aria

Parametro	Valore	
Scambiatori di calore	*Unità Interna*	*Unità Esterna*
Dimensioni [m] (Lunghezza x Larghezza x Altezza)	0.60 x 0.17 x 0.16	1.10 x 0.50 x 0.60
Numero di circuiti – ranghi– tubi per rango	4 – 9 – 8	4 – 3 – 30
Passo tubi longitudinale [m]	0.02	0.02
Passo tubi trasversale [m]	0.02	0.02
Passo Alette[mm]	3	3
Spessore Alette [mm]	0.3	0.3
Diametro Tubi [mm]	7	7
Spessore Tubi [mm]	0.5	0.5
Conducibilità termica Tubi [$Wm^{-1}K^{-1}$]	386 (Rame)	
Conducibilità termica Alette [$Wm^{-1}K^{-1}$]	204 (Alluminio)	

7.2.2 Dati relativi all'utenza

Relativamente ai dati dell'utenza considerati, in Fig. 7 sono riportati i valori di temperatura ambiente durante tutto l'arco dell'anno ed i bins per le cinque condizioni climatiche considerate in quest'analisi.

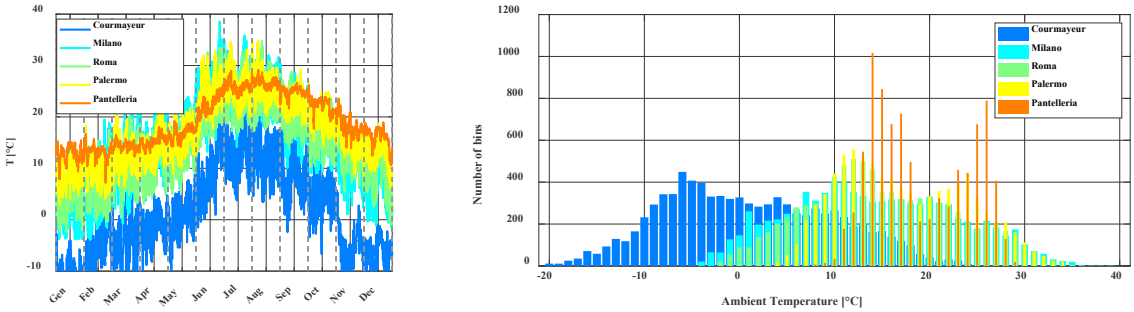

Fig. 7 – Valori di temperatura ambiente (sx) e bins per le 5 località climatiche considerate per questa analisi

Il carico attuale richiesto dall'utenza viene valutato con la seguente relazione, secondo la Direttiva Ecodesign 2016/2281.

$$\dot{Q}_{ut} = \dot{Q}_{des} \cdot \frac{T_{amb} - T_{indoor}}{T_{des} - T_{indoor}}$$

Si considera una temperatura utenza (T_{indoor}) di 20°C nel caso invernale, e di 26°C nel caso estivo. I valori di zona climatica, numero di ore di funzionamento, tipologia di stagione, potenza ($\dot{Q}_{des}$) e temperatura ambiente (T_{des}) di design, temperatura bivalente e periodo di funzionamento secondo la direttiva sono indicati in Tab. 4 per i climi analizzati e per le stagioni invernale ed estiva. Dato che nella condizione climatica di Courmayeur la temperatura ambiente non supera mai i 26°C, si ritiene la macchina non funzionante per la stagione estiva.

Tab. 4 – Zona climatica, ore di funzionamento, potenza richiesta, temperatura ambiente di progetto, temperatura bivalente e periodo di funzionamento per le 5 località climatiche considerate

Clima	**Zona Climatica**	**Invernale ($T_{indoor} = 20°C$)**						**Estivo ($T_{indoor} = 26°C$)**			
		$N_{ore}(T < 15°C)$	*Stagione*	T_{des} $[°C]$	$\dot{Q}_{des}$ $[kW]$	T_{biv} $[°C]$	*Periodo*	T_{des} $[°C]$	$\dot{Q}_{des}$ $[kW]$	T_{biv} $[°C]$	*Periodo*
Courmayeur	F	8136	Più fredda	-22	4	-14.1	Tutto	N.D.			
Milano	E	4787	Media	-10	4	-8.9	Nov-Apr	35	4	39.4	Mag-Set
Roma	D	4749	Media	-10	4	-8.9	Nov-Apr	35	4	39.4	Mag-Set
Palermo	B	3787	Più calda	2	4	-1.3	Dic-Feb	35	4	39.4	Mag-Set
Pantelleria	B	2581	Più calda	2	4	-1.3	Dic-Feb	35	4	39.4	Mag-Set

Le curve di potenza resa della macchina e richiesta dall'utenza, per le modalità riscaldamento (stagioni più fredda, media, più calda) e raffrescamento (stagione media) sono riportate in Fig. 8.

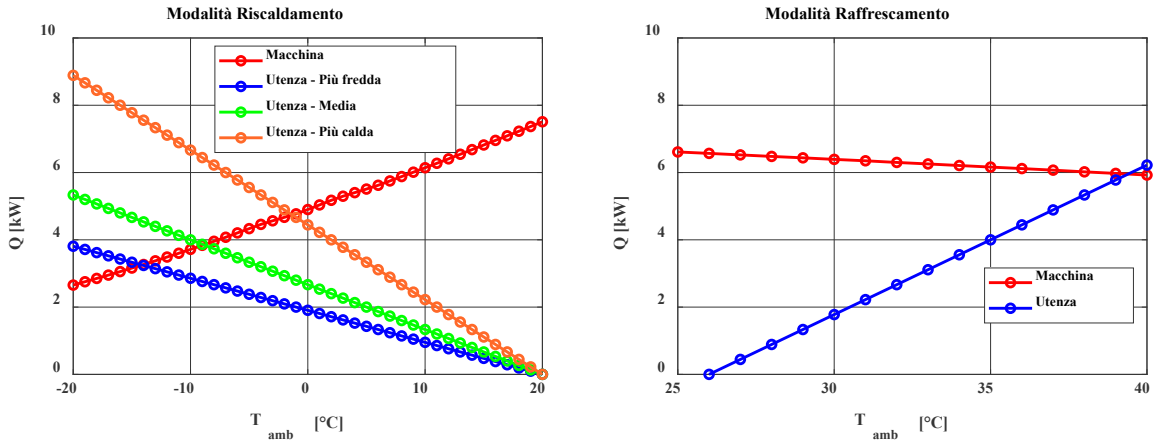

Fig. 8 – Accoppiamento utenza/macchina in modalità riscaldamento (sx) e raffrescamento (dx)

7.2.3 Condizioni operative simulazioni dinamiche

Una valutazione precisa dell'evoluzione di guasto potrebbe essere effettuata tramite un monitoraggio continuo sulla macchina, in dipendenza di condizioni al contorno e all'occorrenza di condizioni accidentali. Non essendo questo possibile, in fase di simulazione sono stati ipotizzati diversi scenari di evoluzione di guasto, che vanno a coprire tutti i range ritenuti possibili, prima di una situazione di guasto grave che verrebbe immediatamente identificato da un utilizzatore. In particolare, su 12 anni di funzionamento della macchina, i seguenti scenari sono considerati, considerando tutte le possibili permutazioni dei seguenti parametri:

- Tipologia e intensità di guasto
  - Nessun guasto (caso ideale)
  - Perdita di refrigerante annua dello 0%, 5%, 10%, 20% con evoluzione lineare durante l'arco dell'anno, indipendente dal numero di ore di funzionamento della macchina
  - Sporcamento unità esterna massimo di 0%, 10%, 20%, 40%, con evoluzione asintotica sigmoidale che evolve soltanto quando la macchina è in funzione (secondo evidenze sperimentali)
  - Sporcamento unità interna massimo di 0%, 10%, 20%, 40%, con evoluzione asintotica sigmoidale che evolve soltanto quando la macchina è in funzione (secondo evidenze sperimentali)
- Strategia di manutenzione
  - Manutenzione non programmata (intervento a macchina non più funzionante, ossia quando non in grado di soddisfare il 50% del carico richiesto dall'utenza)
  - Manutenzione ordinaria ogni 4, 2, 1 anno
- Condizioni climatiche (come da paragrafo precedente)
- Modalità di funzionamento
  - Funzionamento solo estivo
  - Funzionamento reversibile sia estivo che invernale

In totale sono analizzati 64 scenari per ciascun clima e strategia di manutenzione. Inoltre, per ogni configurazione sono valutati i parametri di performance stagionale e di impatto ambientale (SCOP e TEWI), valutati con le seguenti formule, in funzione dell'energia richiesta dall'utenza (Q_{user}), dell'energia elettrica consumata (W_{el}) e del COP attuale:

$$SCOP = \frac{\sum_{t=1}^{n} Q_{user,t}}{\sum_{t=1}^{n} \frac{Q_{user,t}}{COP_t}}$$

$$TEWI = m_{leak} \cdot GWP + W_{el,tot} \cdot f_{ee}$$

m_{leak}, f_{ee}, GWP sono rispettivamente la quantità di carica di refrigerante, il fattore di emissione per la produzione di energia elettrica e il global warming potential del fluido refrigerante adottato.

7.3 Risultati in modalità di funzionamento estiva

In questa sezione sono riportati tutti i risultati ottenuti per il funzionamento in modalità raffrescamento estivo, in termini di piani termodinamici (7.3.1), mappe di performance in condizioni attuali (7.3.2) e simulazioni stagionali (7.3.3) per i climi di riferimento investigati.

7.3.1 Piani in condizioni nominali e di guasto

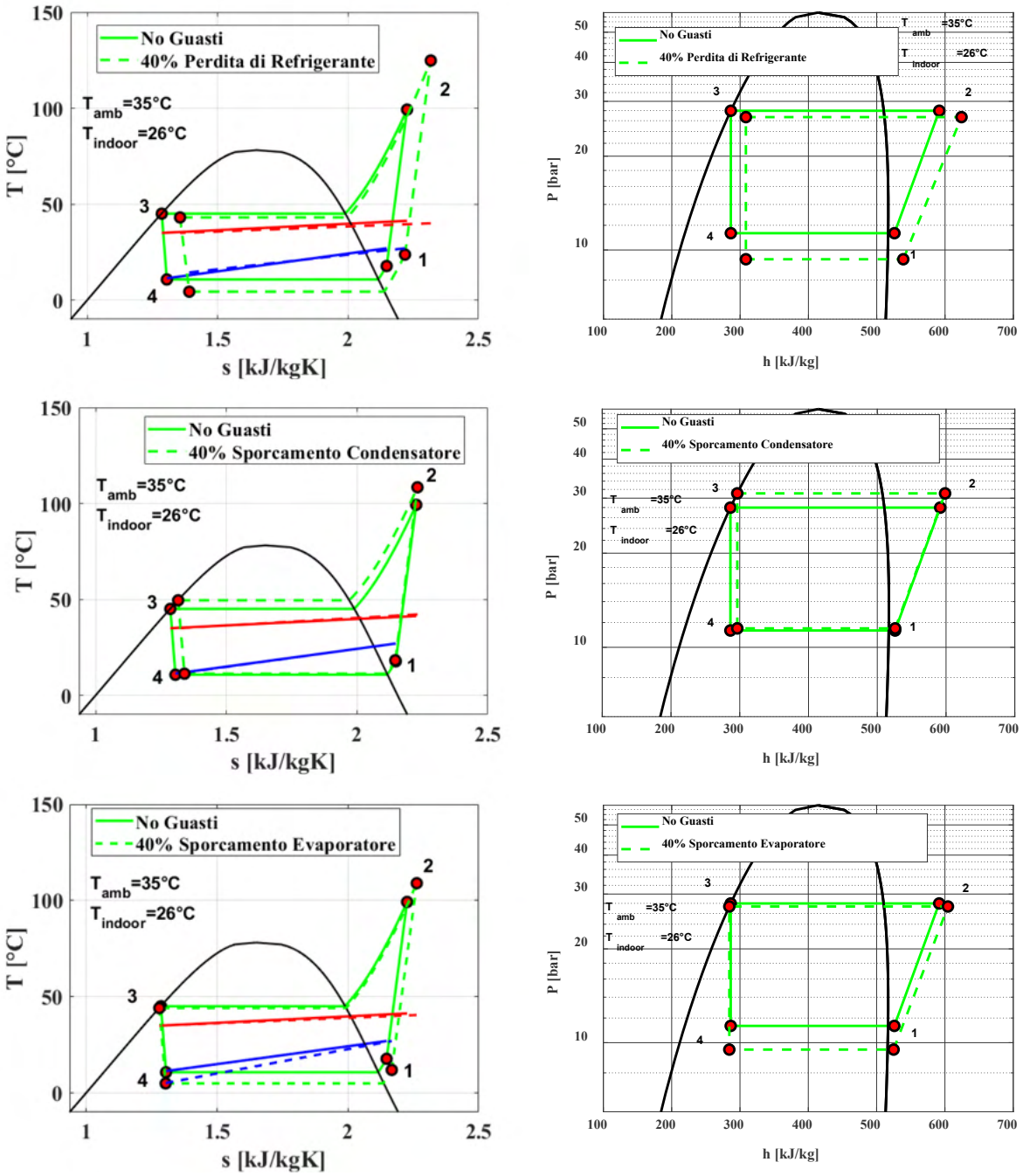

Fig. 9 – Modalità cooling: Diagrammi termodinamici temperatura-entropia specifica (sx) e pressione-entalpia specifica per condizioni nominali e differenti guasti: 40% perdita di refrigerante (in alto); 40% sporcamento condensatore (al centro); 40% sporcamento evaporatore (in basso)

In Fig. 9 si riportano i piani termodinamici T-s e P-h ottenuti per le condizioni fissate di $T_{amb} = 35°C$ e $T_{indoor} = 26°C$, in condizioni senza guasto (cicli in linea continua) e di guasto (cicli in linea tratteggiata) in caso di 40% sporcamento scambiatori e perdita di refrigerante standalone, in cui si possono evincere tutte le variazioni in termini di temperature e pressioni del refrigerante e dei fluidi secondari.

7.3.2 Mappe di performance in modalità raffrescamento

In Fig. 10 e Fig. 11 si riportano le mappe di performance per la resa frigorifera ($\dot{Q}_{ev}$) e del COP in modalità raffrescamento, al variare di temperatura ambiente e dell'intensità (FI) di ciascun guasto. I grafici 3D si riferiscono invece alle iso-superfici di resa e COP, per condizioni al contorno fissate ($T_{amb} = 35°C$, $T_{indoor} = 26°C$) in presenza di guasti simultanei a diversa intensità di guasto. Si nota come la perdita di refrigerante è il guasto che influenza maggiormente resa e COP, con penalizzazione che cresce velocemente all'aumentare dell'intensità di guasto, mentre gli effetti dei due sporcamenti di condensatore ed evaporatore risultano piuttosto simili tra loro.

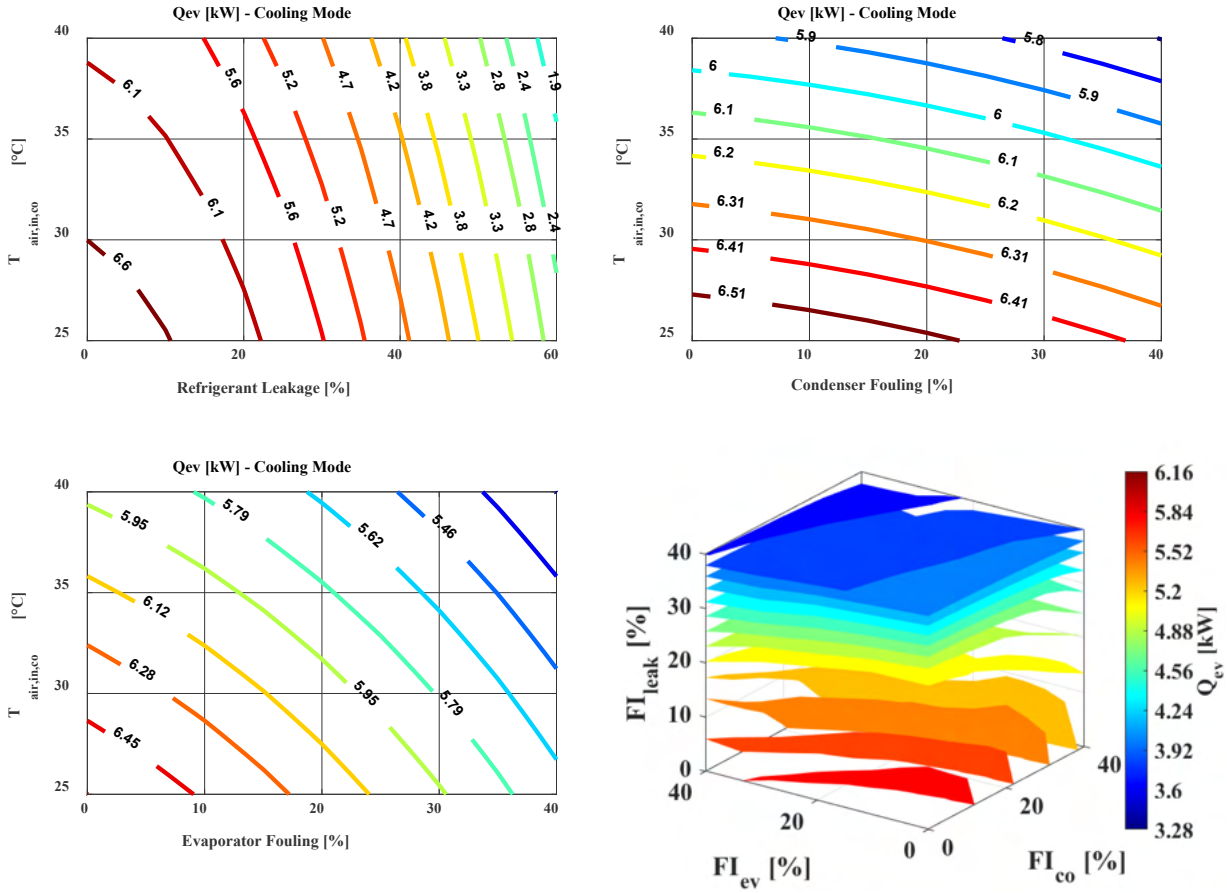

Fig. 10 – Mappe di funzionamento in termini di resa frigorifera per differenti valori della temperatura ambiente ed intensità di guasto. Effetto della perdita di refrigerante (in alto a sx); effetto dello sporcamento al condensatore (in alto a dx); effetto dello sporcamento all'evaporatore (in basso a sx); effetto combinato dei 3 guasti

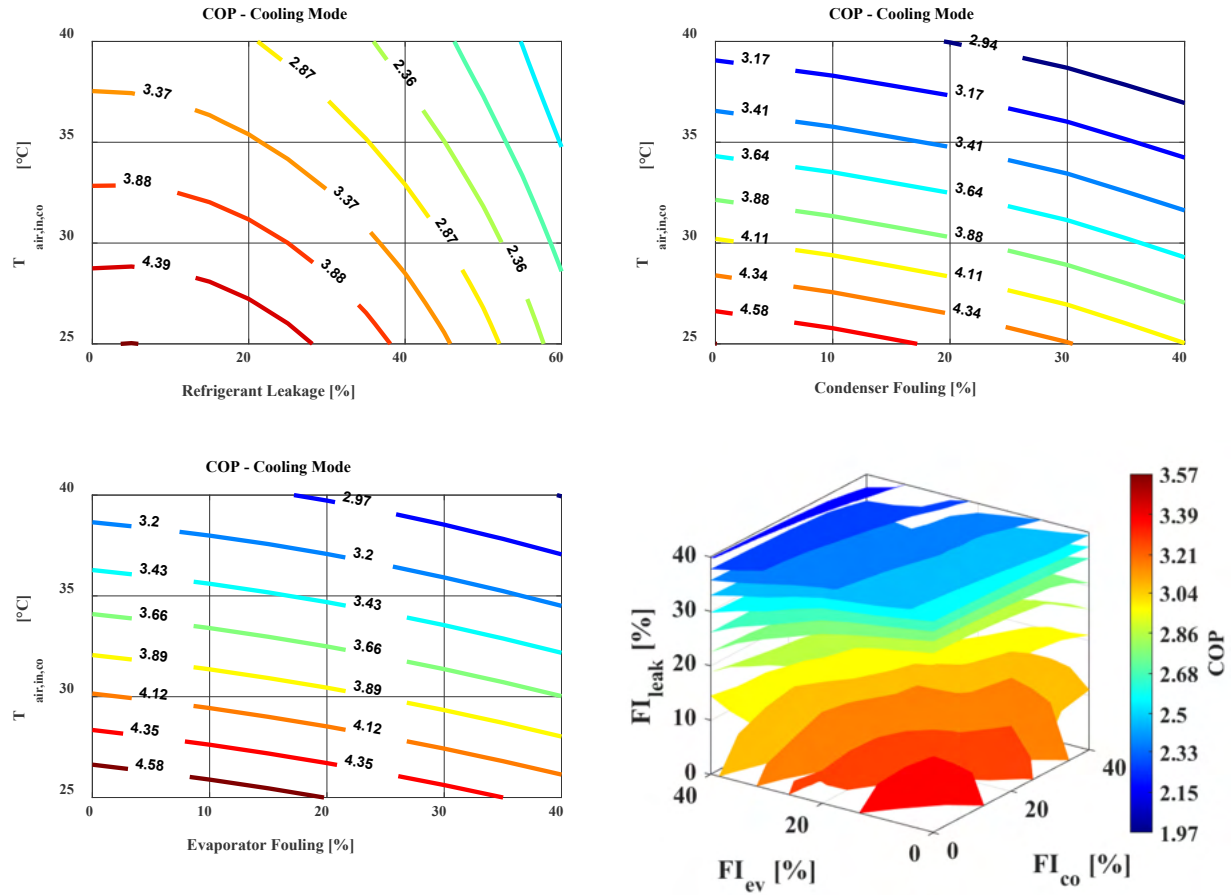

Fig. 11 – Mappe di funzionamento in termini di COP in modalità cooling per differenti valori della temperatura ambiente ed intensità di guasto. Effetto della perdita di refrigerante (in alto a sx); effetto dello sporcamento al condensatore (in alto a dx); effetto dello sporcamento all'evaporatore (in basso a sx); effetto combinato dei 3 guasti

7.3.3 Analisi stagionali di SCOP e TEWI

In questa sezione sono riportati i risultati delle simulazioni stagionali in caso di funzionamento estivo. Le Fig. 12-15 seguenti mostrano la degradazione del COP in funzione del numero di anni, considerando come evoluzioni di guasto una perdita di refrigerante del 10%/annuo, uno sporcamento al condensatore massimo del 40% e all'evaporatore del 20%, nel caso di una manutenzione non programmata (quando la macchina non soddisfa l'esigenza dell'utenza, figure sx) e ordinaria ogni 2 anni (figure dx), e per tutti i climi analizzati per la stagione estiva. Globalmente, nel passaggio da una manutenzione non programmata ad una ordinaria ogni 2 anni si ottiene un vantaggio sullo SCOP e sul TEWI del circa 60% e 20% rispettivamente per Pantelleria e del 40% e 20% rispettivamente per tutti gli altri climi.

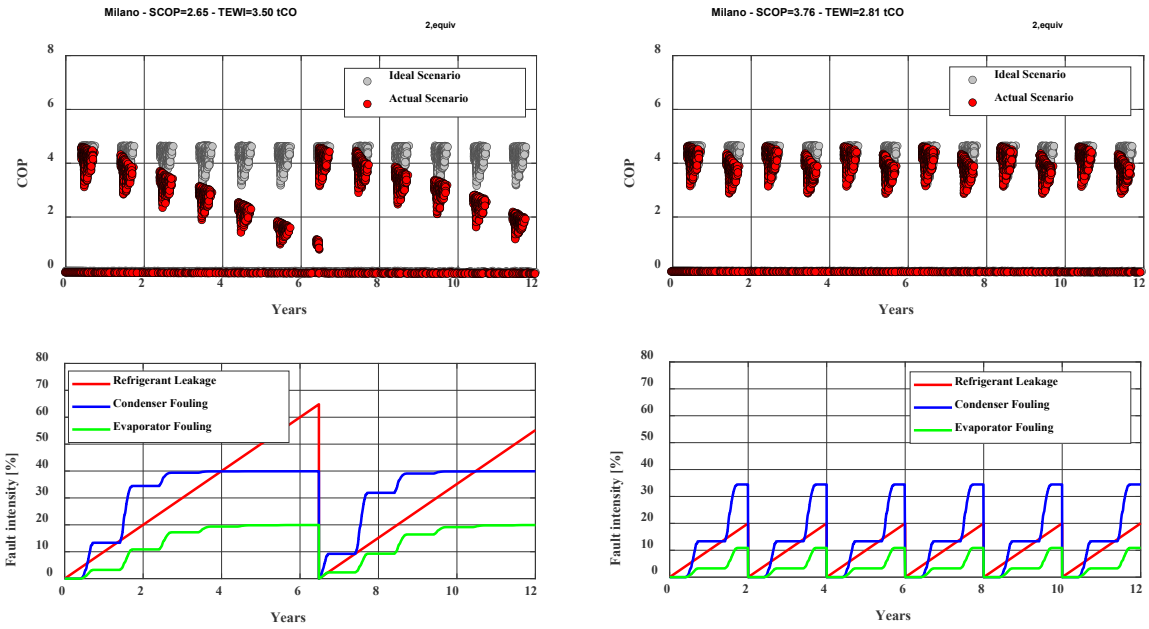

Fig. 12 – Degradazione del COP nel tempo in funzionamento solo estivo considerando una perdita di refrigerante del 10%/annuo, uno sporcamento al condensatore massimo del 40% ed all'evaporatore del 20%, nel caso di manutenzione non programmata (a sx) e programmata ogni 2 anni (a dx) per la località climatica Milano

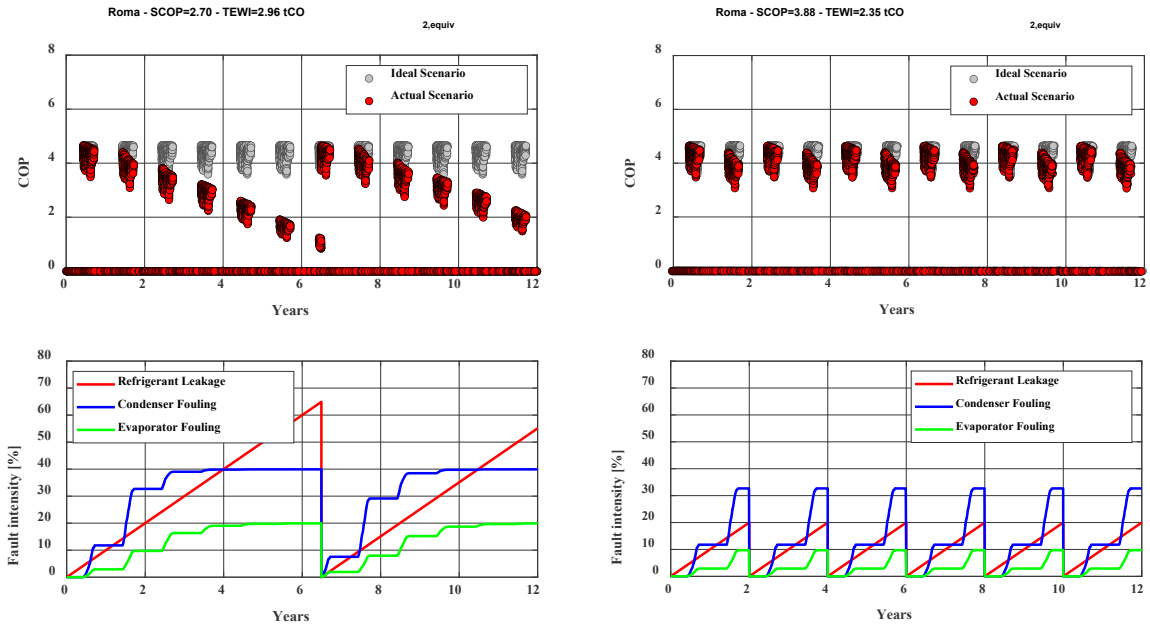

Fig. 13 – Degradazione del COP nel tempo in funzionamento solo estivo considerando una perdita di refrigerante del 10%/annuo, uno sporcamento al condensatore massimo del 40% ed all'evaporatore del 20%, nel caso di manutenzione non programmata (a sx) e programmata ogni 2 anni (a dx) per la località climatica Roma

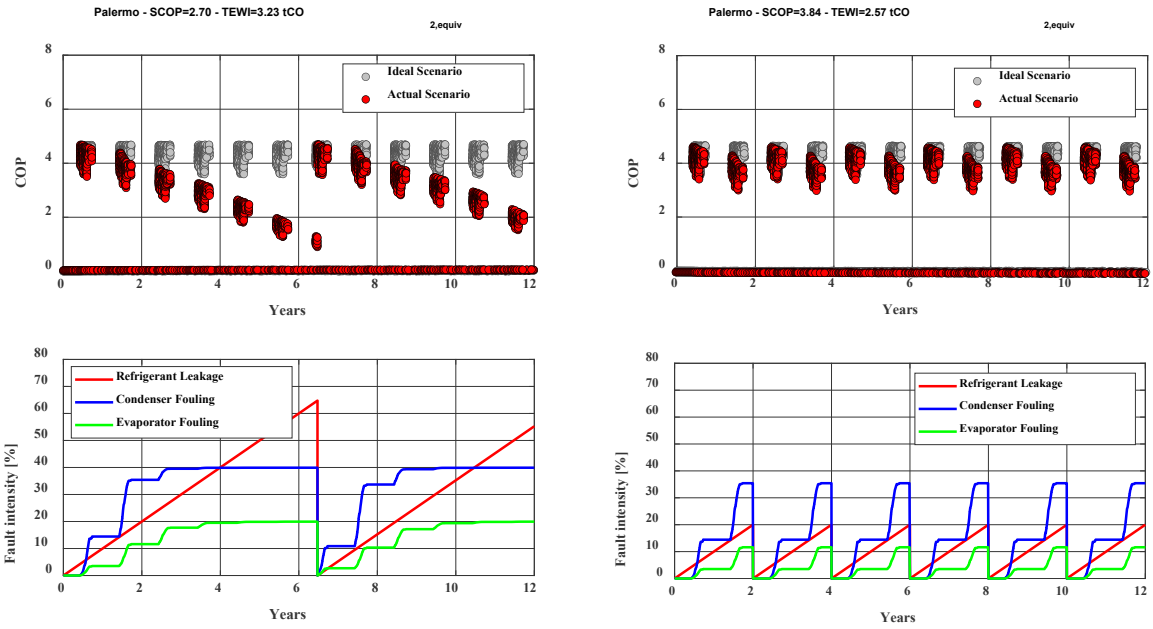

Fig. 14 – Degradazione del COP nel tempo in funzionamento solo estivo considerando una perdita di refrigerante del 10%/annuo, uno sporcamento al condensatore massimo del 40% ed all'evaporatore del 20%, nel caso di manutenzione non programmata (a sx) e programmata ogni 2 anni (a dx) per la località climatica Palermo

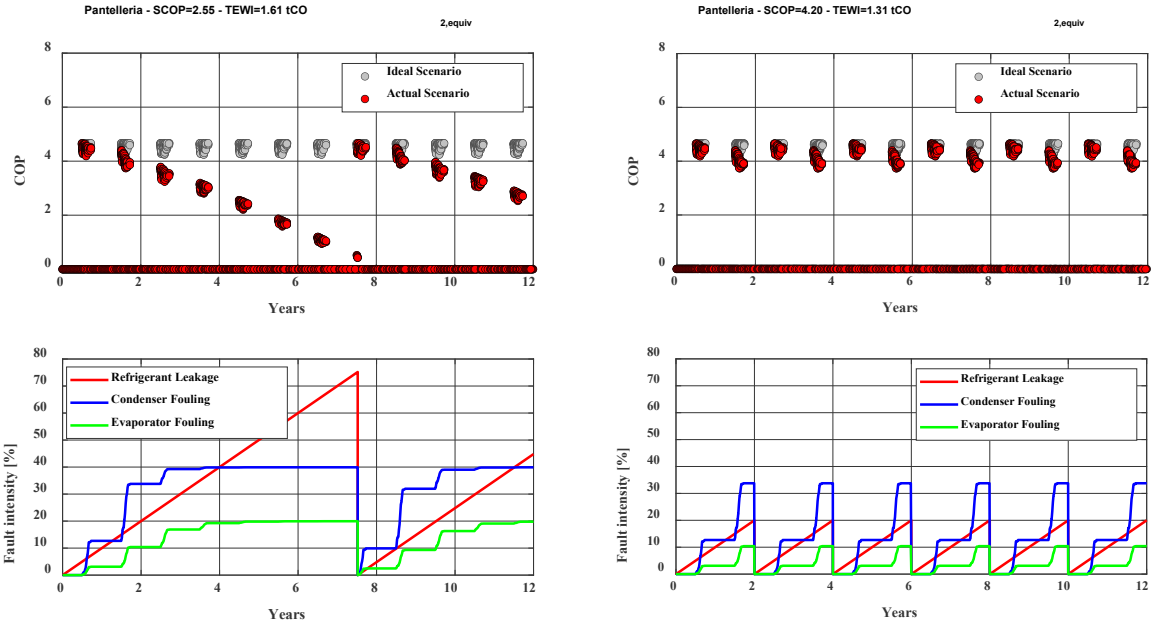

Fig. 15 – Degradazione del COP nel tempo in funzionamento solo estivo considerando una perdita di refrigerante del 10%/annuo, uno sporcamento al condensatore massimo del 40% ed all'evaporatore del 20%, nel caso di manutenzione non programmata (a sx) e programmata ogni 2 anni (a dx) per la località climatica Pantelleria

Tutti i risultati in termini di SCOP, TEWI e numero di interventi di manutenzione, per tutti e 64 gli scenari simulati per ciascun clima e strategia di manutenzione adottata sono riportati nelle seguenti Tab. 5-8. Nel caso di guasti simultanei di grande intensità, e senza alcuna manutenzione programmata, si raggiungono penalizzazioni sullo SCOP superiori anche al 50%

Tab. 5 – Risultati complessivi in modalità cooling nel caso di manutenzione non programmata

Non Programmata				Milano			Roma			Palermo			Pantelleria		
Test	%leak	Sporc_ max_co	Sporc_ max_ev	SCOP	TEWI	Nman	SCOP	TEWI	Nman	SCOP	TEWI	Nman	SCOP	TEWI	Nman
1	0	0	0	4,02	1,86	0	4,13	1,43	0	4,12	1,62	0	4,48	0,45	0
2	0	10	0	3,93	1,90	0	4,04	1,46	0	4,03	1,66	0	4,38	0,46	0
3	0	20	0	3,83	1,95	0	3,94	1,50	0	3,93	1,71	0	4,26	0,47	0
4	0	40	0	3,54	2,11	0	3,64	1,63	0	3,62	1,85	0	3,92	0,51	0
5	0	0	10	3,95	1,89	0	4,06	1,46	0	4,05	1,65	0	4,40	0,46	0
6	0	10	10	3,86	1,93	0	3,97	1,49	0	3,96	1,69	0	4,30	0,47	0
7	0	20	10	3,76	1,98	0	3,87	1,53	0	3,86	1,74	0	4,19	0,48	0
8	0	40	10	3,48	2,14	0	3,58	1,65	0	3,56	1,88	0	3,86	0,52	0
9	0	0	20	3,86	1,93	0	3,97	1,49	0	3,96	1,69	0	4,31	0,47	0
10	0	10	20	3,78	1,97	0	3,89	1,52	0	3,88	1,73	0	4,21	0,48	0
11	0	20	20	3,69	2,02	0	3,79	1,56	0	3,78	1,77	0	4,10	0,49	0
12	0	40	20	3,41	2,19	0	3,51	1,69	0	3,49	1,92	0	3,78	0,53	0
13	0	0	40	3,64	2,05	0	3,74	1,58	0	3,73	1,80	0	4,05	0,50	0
14	0	10	40	3,57	2,09	0	3,67	1,61	0	3,65	1,83	0	3,97	0,51	0
15	0	20	40	3,48	2,14	0	3,58	1,65	0	3,56	1,88	0	3,87	0,52	0
16	0	40	40	3,23	2,31	0	3,32	1,78	0	3,30	2,03	0	3,58	0,56	0
17	5	0	0	3,41	2,58	1	3,08	2,32	1	3,08	2,57	1	3,29	1,02	0
18	5	10	0	3,33	2,63	1	3,00	2,36	1	3,00	2,62	1	3,20	1,04	0
19	5	20	0	3,24	2,69	1	2,92	2,42	1	2,91	2,68	1	3,11	1,06	0
20	5	40	0	3,00	2,87	1	2,69	2,59	1	2,68	2,87	1	2,85	1,12	0
21	5	0	10	3,39	2,59	1	3,00	2,36	0	3,00	2,61	0	3,26	1,03	0
22	5	10	10	3,31	2,64	1	2,93	2,41	0	2,93	2,66	0	3,18	1,05	0
23	5	20	10	3,22	2,70	1	2,84	2,46	0	2,84	2,73	0	3,09	1,06	0
24	5	40	10	2,90	2,94	1	2,61	2,64	0	2,61	2,94	0	2,83	1,12	0
25	5	0	20	3,13	2,75	1	2,97	2,37	0	2,97	2,63	0	3,23	1,03	0
26	5	10	20	3,06	2,80	1	2,90	2,42	0	2,90	2,68	0	3,15	1,05	0
27	5	20	20	2,97	2,87	1	2,82	2,48	0	2,82	2,75	0	3,06	1,07	0
28	5	40	20	2,74	3,07	1	2,60	2,66	0	2,59	2,95	0	2,81	1,13	0
29	5	0	40	3,03	2,82	1	2,89	2,43	0	2,89	2,69	0	3,14	1,05	0
30	5	10	40	2,97	2,87	1	2,83	2,48	0	2,82	2,75	0	3,07	1,07	0
31	5	20	40	2,88	2,94	1	2,74	2,54	0	2,74	2,82	0	2,98	1,09	0
32	5	40	40	2,67	3,14	1	2,53	2,71	0	2,53	3,02	0	2,75	1,14	0

Non Programmata				Milano			Roma			Palermo			Pantelleria		
Test	%leak	Sporc_ max_co	Sporc_ max_ev	SCOP	TEWI	Nman	SCOP	TEWI	Nman	SCOP	TEWI	Nman	SCOP	TEWI	Nman
33	10	0	0	3,23	3,07	2	3,13	2,68	1	3,13	2,91	1	2,92	1,51	1
34	10	10	0	3,16	3,11	2	3,06	2,72	1	3,04	2,97	1	2,86	1,53	1
35	10	20	0	3,08	3,17	2	2,98	2,77	1	2,97	3,02	1	2,80	1,54	1
36	10	40	0	2,87	3,34	2	2,77	2,91	1	2,74	3,20	1	2,61	1,60	1
37	10	0	10	3,21	3,07	2	3,08	2,70	1	3,09	2,93	1	2,90	1,52	1
38	10	10	10	3,07	3,16	2	3,01	2,74	1	3,02	2,98	1	2,81	1,54	1
39	10	20	10	2,99	3,22	2	2,93	2,79	1	2,94	3,04	1	2,75	1,55	1
40	10	40	10	2,79	3,39	2	2,72	2,94	1	2,72	3,21	1	2,57	1,61	1
41	10	0	20	3,00	3,20	1	3,06	2,71	1	3,06	2,95	1	2,85	1,53	1
42	10	10	20	2,93	3,25	1	2,99	2,76	1	3,00	3,00	1	2,79	1,54	1
43	10	20	20	2,86	3,31	1	2,91	2,81	1	2,92	3,05	1	2,73	1,56	1
44	10	40	20	2,65	3,50	1	2,70	2,96	1	2,70	3,23	1	2,55	1,61	1
45	10	0	40	2,94	3,24	1	3,00	2,75	1	3,00	2,99	1	2,79	1,54	1
46	10	10	40	2,88	3,29	1	2,93	2,79	1	2,88	3,08	1	2,74	1,56	1
47	10	20	40	2,80	3,35	1	2,86	2,84	1	2,81	3,14	1	2,69	1,57	1
48	10	40	40	2,60	3,54	1	2,65	3,00	1	2,61	3,31	1	2,51	1,62	1
49	20	0	0	2,95	4,00	3	3,02	3,53	3	3,00	3,78	3	2,55	2,44	3
50	20	10	0	2,91	4,03	3	2,91	3,60	3	2,95	3,82	3	2,51	2,45	3
51	20	20	0	2,86	4,06	3	2,85	3,63	3	2,90	3,85	3	2,23	2,54	2
52	20	40	0	2,72	4,19	3	2,71	3,73	3	2,74	3,97	3	2,12	2,59	2
53	20	0	10	2,95	3,99	3	2,93	3,57	3	2,99	3,78	3	2,28	2,52	2
54	20	10	10	2,89	4,03	3	2,88	3,60	3	2,93	3,82	3	2,25	2,54	2
55	20	20	10	2,84	4,07	3	2,83	3,64	3	2,88	3,86	3	2,22	2,55	2
56	20	40	10	2,69	4,20	3	2,69	3,74	3	2,72	3,99	3	2,10	2,60	2
57	20	0	20	2,92	4,00	3	2,88	3,60	3	2,96	3,79	3	2,26	2,53	2
58	20	10	20	2,88	4,04	3	2,82	3,64	3	2,91	3,83	3	2,23	2,54	2
59	20	20	20	2,82	4,08	3	2,77	3,67	3	2,84	3,89	3	2,20	2,55	2
60	20	40	20	2,68	4,21	3	2,63	3,78	3	2,68	4,01	3	2,10	2,60	2
61	20	0	40	2,89	4,02	3	2,84	3,62	3	2,91	3,83	3	2,25	2,54	2
62	20	10	40	2,85	4,06	3	2,79	3,65	3	2,86	3,86	3	2,22	2,55	2
63	20	20	40	2,80	4,10	3	2,74	3,69	3	2,80	3,91	3	2,19	2,56	2
64	20	40	40	2,65	4,23	3	2,61	3,79	3	2,65	4,04	3	2,09	2,60	2

Tab. 6 – Risultati complessivi in modalità cooling nel caso di manutenzione programmata ogni 4 anni

Ordinaria ogni 4 anni				Milano			Roma			Palermo			Pantelleria		
Test	%leak	Sporc_ max_co	Sporc_ max_ev	SCOP	TEWI	Nman	SCOP	TEWI	Nman	SCOP	TEWI	Nman	SCOP	TEWI	Nman
1	0	0	0	4,02	1,86	3	4,13	1,43	3	4,12	1,62	3	4,48	0,45	3
2	0	10	0	3,96	1,89	3	4,07	1,45	3	4,06	1,65	3	4,40	0,46	3
3	0	20	0	3,88	1,92	3	3,99	1,48	3	3,97	1,68	3	4,32	0,47	3
4	0	40	0	3,67	2,03	3	3,78	1,56	3	3,75	1,78	3	4,07	0,49	3
5	0	0	10	3,98	1,88	3	4,09	1,45	3	4,08	1,64	3	4,43	0,45	3
6	0	10	10	3,91	1,91	3	4,03	1,47	3	4,01	1,67	3	4,36	0,46	3
7	0	20	10	3,84	1,94	3	3,95	1,50	3	3,93	1,70	3	4,27	0,47	3
8	0	40	10	3,63	2,05	3	3,75	1,58	3	3,71	1,80	3	4,03	0,50	3
9	0	0	20	3,93	1,90	3	4,04	1,46	3	4,02	1,66	3	4,38	0,46	3
10	0	10	20	3,86	1,93	3	3,98	1,49	3	3,96	1,69	3	4,31	0,47	3
11	0	20	20	3,79	1,97	3	3,90	1,51	3	3,88	1,73	3	4,22	0,48	3
12	0	40	20	3,59	2,08	3	3,70	1,60	3	3,67	1,83	3	3,99	0,50	3
13	0	0	40	3,80	1,96	3	3,92	1,51	3	3,89	1,72	3	4,24	0,47	3
14	0	10	40	3,74	1,99	3	3,86	1,53	3	3,83	1,75	3	4,17	0,48	3
15	0	20	40	3,67	2,03	3	3,79	1,56	3	3,75	1,78	3	4,09	0,49	3
16	0	40	40	3,48	2,14	3	3,60	1,64	3	3,55	1,89	3	3,87	0,52	3
17	5	0	0	3,97	2,29	3	4,08	1,86	3	4,08	2,06	3	4,44	0,87	3
18	5	10	0	3,89	2,33	3	4,01	1,89	3	4,00	2,09	3	4,36	0,87	3
19	5	20	0	3,81	2,37	3	3,92	1,92	3	3,91	2,13	3	4,26	0,88	3
20	5	40	0	3,58	2,49	3	3,70	2,01	3	3,67	2,24	3	4,00	0,92	3
21	5	0	10	3,92	2,31	3	4,04	1,88	3	4,03	2,08	3	4,39	0,87	3
22	5	10	10	3,85	2,35	3	3,97	1,90	3	3,95	2,11	3	4,32	0,88	3
23	5	20	10	3,77	2,39	3	3,89	1,93	3	3,87	2,14	3	4,22	0,89	3
24	5	40	10	3,55	2,51	3	3,67	2,03	3	3,64	2,26	3	3,97	0,92	3
25	5	0	20	3,88	2,34	3	4,00	1,89	3	3,98	2,10	3	4,34	0,88	3
26	5	10	20	3,81	2,37	3	3,93	1,92	3	3,91	2,13	3	4,27	0,88	3
27	5	20	20	3,73	2,41	3	3,85	1,95	3	3,82	2,16	3	4,17	0,89	3
28	5	40	20	3,51	2,53	3	3,63	2,04	3	3,59	2,28	3	3,93	0,93	3
29	5	0	40	3,76	2,40	3	3,88	1,94	3	3,85	2,15	3	4,21	0,89	3
30	5	10	40	3,69	2,43	3	3,81	1,96	3	3,78	2,18	3	4,14	0,90	3
31	5	20	40	3,61	2,47	3	3,74	2,00	3	3,70	2,22	3	4,05	0,91	3
32	5	40	40	3,41	2,60	3	3,53	2,09	3	3,49	2,33	3	3,81	0,94	3

Ordinaria ogni 4 anni				Milano			Roma			Palermo			Pantelleria		
Test	%leak	Sporc_ max_co	Sporc_ max_ev	SCOP	TEWI	Nman	SCOP	TEWI	Nman	SCOP	TEWI	Nman	SCOP	TEWI	Nman
33	10	0	0	3,67	2,85	3	3,78	2,39	3	3,78	2,60	3	4,12	1,31	3
34	10	10	0	3,60	2,90	3	3,71	2,42	3	3,70	2,64	3	4,04	1,32	3
35	10	20	0	3,51	2,94	3	3,62	2,46	3	3,61	2,68	3	3,94	1,34	3
36	10	40	0	3,29	3,09	3	3,40	2,57	3	3,37	2,81	3	3,68	1,37	3
37	10	0	10	3,65	2,86	3	3,76	2,40	3	3,75	2,61	3	4,10	1,32	3
38	10	10	10	3,58	2,90	3	3,69	2,43	3	3,68	2,65	3	4,01	1,33	3
39	10	20	10	3,49	2,95	3	3,60	2,47	3	3,59	2,69	3	3,92	1,34	3
40	10	40	10	3,27	3,10	3	3,38	2,58	3	3,35	2,83	3	3,66	1,38	3
41	10	0	20	3,62	2,88	3	3,74	2,41	3	3,72	2,63	3	4,07	1,32	3
42	10	10	20	3,55	2,92	3	3,66	2,44	3	3,65	2,66	3	3,99	1,33	3
43	10	20	20	3,47	2,97	3	3,58	2,48	3	3,56	2,71	3	3,89	1,34	3
44	10	40	20	3,25	3,11	3	3,36	2,59	3	3,33	2,84	3	3,64	1,38	3
45	10	0	40	3,55	2,92	3	3,67	2,44	3	3,64	2,67	3	3,98	1,33	3
46	10	10	40	3,48	2,96	3	3,60	2,47	3	3,57	2,70	3	3,91	1,34	3
47	10	20	40	3,40	3,01	3	3,51	2,51	3	3,48	2,75	3	3,82	1,35	3
48	10	40	40	3,19	3,15	3	3,30	2,62	3	3,26	2,88	3	3,58	1,39	3
49	20	0	0	3,32	3,88	4	3,24	3,47	3	3,12	3,78	3	2,57	2,43	3
50	20	10	0	3,27	3,91	4	3,07	3,56	3	3,07	3,81	3	2,53	2,44	3
51	20	20	0	3,21	3,95	4	2,94	3,63	3	3,01	3,85	3	2,15	2,58	3
52	20	40	0	3,06	4,06	4	2,80	3,73	3	2,84	3,97	3	1,64	2,86	3
53	20	0	10	3,15	3,97	3	2,97	3,60	3	3,10	3,78	3	1,72	2,81	3
54	20	10	10	3,10	4,00	3	2,91	3,63	3	2,98	3,86	3	1,71	2,81	3
55	20	20	10	3,04	4,05	3	2,86	3,67	3	2,92	3,90	3	1,69	2,82	3
56	20	40	10	2,88	4,17	3	2,71	3,78	3	2,76	4,03	3	1,64	2,86	3
57	20	0	20	3,14	3,96	3	2,95	3,61	3	3,01	3,83	3	1,72	2,80	3
58	20	10	20	3,07	4,01	3	2,88	3,65	3	2,96	3,87	3	1,71	2,81	3
59	20	20	20	3,01	4,06	3	2,81	3,70	3	2,87	3,93	3	1,69	2,82	3
60	20	40	20	2,85	4,19	3	2,64	3,82	3	2,71	4,06	3	1,64	2,86	3
61	20	0	40	3,09	3,99	3	2,85	3,66	3	2,93	3,88	3	1,71	2,81	3
62	20	10	40	3,04	4,03	3	2,81	3,69	3	2,88	3,92	3	1,70	2,82	3
63	20	20	40	2,98	4,08	3	2,76	3,73	3	2,81	3,97	3	1,69	2,83	3
64	20	40	40	2,82	4,21	3	2,62	3,83	3	2,66	4,11	3	1,63	2,86	3

Tab. 7 – Risultati complessivi in modalità cooling nel caso di manutenzione programmata ogni 2 anni

Ordinaria ogni 2 anni				Milano			Roma			Palermo			Pantelleria		
Test	%leak	Sporc_ max_co	Sporc_ max_ev	SCOP	TEWI	Nman	SCOP	TEWI	Nman	SCOP	TEWI	Nman	SCOP	TEWI	Nman
1	0	0	0	4,02	1,86	6	4,13	1,43	6	4,12	1,62	6	4,48	0,45	6
2	0	10	0	3,98	1,87	6	4,10	1,44	6	4,09	1,64	6	4,44	0,45	6
3	0	20	0	3,95	1,89	6	4,06	1,46	6	4,04	1,66	6	4,40	0,46	6
4	0	40	0	3,85	1,94	6	3,97	1,49	6	3,94	1,70	6	4,29	0,47	6
5	0	0	10	4,00	1,86	6	4,12	1,44	6	4,11	1,63	6	4,46	0,45	6
6	0	10	10	3,97	1,88	6	4,08	1,45	6	4,07	1,65	6	4,42	0,45	6
7	0	20	10	3,93	1,90	6	4,05	1,46	6	4,03	1,66	6	4,38	0,46	6
8	0	40	10	3,84	1,94	6	3,96	1,49	6	3,92	1,71	6	4,27	0,47	6
9	0	0	20	3,99	1,87	6	4,10	1,44	6	4,09	1,64	6	4,44	0,45	6
10	0	10	20	3,95	1,89	6	4,07	1,45	6	4,05	1,65	6	4,40	0,46	6
11	0	20	20	3,91	1,90	6	4,03	1,47	6	4,01	1,67	6	4,36	0,46	6
12	0	40	20	3,82	1,95	6	3,94	1,50	6	3,90	1,72	6	4,25	0,47	6
13	0	0	40	3,95	1,89	6	4,07	1,45	6	4,05	1,65	6	4,40	0,46	6
14	0	10	40	3,92	1,90	6	4,03	1,47	6	4,01	1,67	6	4,36	0,46	6
15	0	20	40	3,88	1,92	6	4,00	1,48	6	3,97	1,69	6	4,32	0,46	6
16	0	40	40	3,79	1,97	6	3,91	1,51	6	3,86	1,73	6	4,22	0,48	6
17	5	0	0	4,01	2,27	6	4,13	1,85	6	4,12	2,04	6	4,48	0,86	6
18	5	10	0	3,98	2,29	6	4,09	1,86	6	4,08	2,06	6	4,44	0,87	6
19	5	20	0	3,93	2,31	6	4,05	1,87	6	4,03	2,07	6	4,39	0,87	6
20	5	40	0	3,83	2,36	6	3,96	1,91	6	3,92	2,12	6	4,28	0,88	6
21	5	0	10	4,00	2,28	6	4,11	1,85	6	4,10	2,05	6	4,46	0,86	6
22	5	10	10	3,96	2,30	6	4,08	1,86	6	4,06	2,06	6	4,43	0,87	6
23	5	20	10	3,92	2,32	6	4,04	1,88	6	4,02	2,08	6	4,38	0,87	6
24	5	40	10	3,82	2,37	6	3,94	1,91	6	3,90	2,13	6	4,26	0,88	6
25	5	0	20	3,98	2,29	6	4,10	1,86	6	4,08	2,05	6	4,44	0,87	6
26	5	10	20	3,94	2,30	6	4,06	1,87	6	4,04	2,07	6	4,41	0,87	6
27	5	20	20	3,90	2,32	6	4,02	1,88	6	4,00	2,09	6	4,36	0,87	6
28	5	40	20	3,80	2,37	6	3,93	1,92	6	3,89	2,14	6	4,24	0,89	6
29	5	0	40	3,94	2,30	6	4,06	1,87	6	4,04	2,07	6	4,40	0,87	6
30	5	10	40	3,91	2,32	6	4,03	1,88	6	4,00	2,09	6	4,37	0,87	6
31	5	20	40	3,87	2,34	6	3,99	1,90	6	3,96	2,11	6	4,32	0,88	6
32	5	40	40	3,77	2,39	6	3,90	1,93	6	3,85	2,15	6	4,21	0,89	6

Ordinaria ogni 2 anni				Milano			Roma			Palermo			Pantelleria		
Test	%leak	Sporc_ max_co	Sporc_ max_ev	SCOP	TEWI	Nman	SCOP	TEWI	Nman	SCOP	TEWI	Nman	SCOP	TEWI	Nman
33	10	0	0	3,97	2,71	6	4,09	2,27	6	4,08	2,47	6	4,44	1,28	6
34	10	10	0	3,93	2,73	6	4,05	2,29	6	4,03	2,49	6	4,40	1,28	6
35	10	20	0	3,89	2,75	6	4,01	2,30	6	3,99	2,51	6	4,35	1,29	6
36	10	40	0	3,78	2,80	6	3,91	2,34	6	3,87	2,56	6	4,23	1,30	6
37	10	0	10	3,95	2,71	6	4,07	2,28	6	4,06	2,48	6	4,42	1,28	6
38	10	10	10	3,91	2,73	6	4,03	2,29	6	4,02	2,49	6	4,38	1,29	6
39	10	20	10	3,87	2,75	6	3,99	2,31	6	3,97	2,51	6	4,33	1,29	6
40	10	40	10	3,77	2,81	6	3,90	2,34	6	3,86	2,56	6	4,21	1,30	6
41	10	0	20	3,94	2,72	6	4,06	2,29	6	4,04	2,48	6	4,40	1,28	6
42	10	10	20	3,90	2,74	6	4,02	2,30	6	4,00	2,50	6	4,36	1,29	6
43	10	20	20	3,86	2,76	6	3,98	2,31	6	3,95	2,52	6	4,31	1,29	6
44	10	40	20	3,76	2,81	6	3,88	2,35	6	3,84	2,57	6	4,20	1,31	6
45	10	0	40	3,90	2,74	6	4,02	2,30	6	4,00	2,50	6	4,37	1,29	6
46	10	10	40	3,86	2,76	6	3,99	2,31	6	3,96	2,52	6	4,32	1,29	6
47	10	20	40	3,82	2,78	6	3,95	2,32	6	3,92	2,54	6	4,28	1,30	6
48	10	40	40	3,72	2,83	6	3,85	2,36	6	3,81	2,59	6	4,16	1,31	6
49	20	0	0	3,69	3,67	6	3,80	3,21	6	3,79	3,42	6	4,13	2,14	6
50	20	10	0	3,65	3,70	6	3,76	3,23	6	3,75	3,44	6	4,08	2,15	6
51	20	20	0	3,60	3,72	6	3,71	3,25	6	3,70	3,46	6	4,03	2,15	6
52	20	40	0	3,49	3,78	6	3,62	3,29	6	3,58	3,52	6	3,91	2,17	6
53	20	0	10	3,68	3,68	6	3,79	3,22	6	3,78	3,43	6	4,12	2,14	6
54	20	10	10	3,64	3,70	6	3,75	3,23	6	3,74	3,45	6	4,07	2,15	6
55	20	20	10	3,60	3,72	6	3,71	3,25	6	3,69	3,47	6	4,02	2,15	6
56	20	40	10	3,49	3,79	6	3,61	3,29	6	3,57	3,53	6	3,91	2,17	6
57	20	0	20	3,67	3,68	6	3,78	3,22	6	3,77	3,43	6	4,11	2,14	6
58	20	10	20	3,63	3,70	6	3,74	3,23	6	3,73	3,45	6	4,06	2,15	6
59	20	20	20	3,59	3,73	6	3,70	3,25	6	3,68	3,47	6	4,01	2,16	6
60	20	40	20	3,48	3,79	6	3,60	3,30	6	3,56	3,53	6	3,90	2,17	6
61	20	0	40	3,65	3,69	6	3,76	3,23	6	3,75	3,44	6	4,09	2,15	6
62	20	10	40	3,61	3,71	6	3,73	3,24	6	3,71	3,46	6	4,04	2,15	6
63	20	20	40	3,57	3,74	6	3,69	3,26	6	3,66	3,48	6	3,99	2,16	6
64	20	40	40	3,46	3,80	6	3,59	3,30	6	3,54	3,54	6	3,88	2,17	6

Tab. 8 – Risultati complessivi in modalità cooling nel caso di manutenzione programmata ogni anno

Ordinaria ogni anno				Milano			Roma			Palermo			Pantelleria		
Test	%leak	Sporc_ max_co	Sporc_ max_ev	SCOP	TEWI	Nman	SCOP	TEWI	Nman	SCOP	TEWI	Nman	SCOP	TEWI	Nman
1	0	0	0	4,02	1,86	12	4,13	1,43	12	4,12	1,62	12	4,48	0,45	12
2	0	10	0	4,01	1,86	12	4,12	1,43	12	4,11	1,63	12	4,47	0,45	12
3	0	20	0	4,00	1,86	12	4,11	1,44	12	4,10	1,63	12	4,45	0,45	12
4	0	40	0	3,98	1,87	12	4,09	1,45	12	4,08	1,64	12	4,43	0,45	12
5	0	0	10	4,01	1,86	12	4,13	1,43	12	4,12	1,63	12	4,47	0,45	12
6	0	10	10	4,00	1,86	12	4,12	1,44	12	4,11	1,63	12	4,46	0,45	12
7	0	20	10	3,99	1,87	12	4,11	1,44	12	4,09	1,64	12	4,45	0,45	12
8	0	40	10	3,97	1,88	12	4,09	1,45	12	4,07	1,64	12	4,42	0,45	12
9	0	0	20	4,01	1,86	12	4,12	1,43	12	4,11	1,63	12	4,47	0,45	12
10	0	10	20	4,00	1,86	12	4,11	1,44	12	4,10	1,63	12	4,45	0,45	12
11	0	20	20	3,99	1,87	12	4,10	1,44	12	4,09	1,64	12	4,44	0,45	12
12	0	40	20	3,97	1,88	12	4,08	1,45	12	4,07	1,65	12	4,42	0,45	12
13	0	0	40	4,00	1,86	12	4,11	1,44	12	4,10	1,63	12	4,46	0,45	12
14	0	10	40	3,99	1,87	12	4,10	1,44	12	4,09	1,64	12	4,44	0,45	12
15	0	20	40	3,98	1,87	12	4,09	1,44	12	4,08	1,64	12	4,43	0,45	12
16	0	40	40	3,96	1,88	12	4,07	1,45	12	4,05	1,65	12	4,41	0,46	12
17	5	0	0	4,02	2,27	12	4,13	1,84	12	4,12	2,04	12	4,48	0,86	12
18	5	10	0	4,01	2,27	12	4,12	1,85	12	4,11	2,04	12	4,47	0,86	12
19	5	20	0	4,00	2,28	12	4,11	1,85	12	4,10	2,05	12	4,45	0,86	12
20	5	40	0	3,98	2,29	12	4,09	1,86	12	4,08	2,06	12	4,43	0,87	12
21	5	0	10	4,01	2,27	12	4,13	1,85	12	4,12	2,04	12	4,47	0,86	12
22	5	10	10	4,00	2,28	12	4,12	1,85	12	4,11	2,04	12	4,46	0,86	12
23	5	20	10	3,99	2,28	12	4,11	1,85	12	4,10	2,05	12	4,45	0,87	12
24	5	40	10	3,97	2,29	12	4,09	1,86	12	4,07	2,06	12	4,42	0,87	12
25	5	0	20	4,01	2,27	12	4,12	1,85	12	4,11	2,04	12	4,47	0,86	12
26	5	10	20	4,00	2,28	12	4,11	1,85	12	4,10	2,05	12	4,45	0,86	12
27	5	20	20	3,99	2,28	12	4,10	1,86	12	4,09	2,05	12	4,44	0,87	12
28	5	40	20	3,97	2,29	12	4,08	1,86	12	4,07	2,06	12	4,42	0,87	12
29	5	0	40	4,00	2,28	12	4,11	1,85	12	4,10	2,05	12	4,46	0,86	12
30	5	10	40	3,99	2,28	12	4,10	1,85	12	4,09	2,05	12	4,44	0,87	12
31	5	20	40	3,98	2,29	12	4,09	1,86	12	4,08	2,06	12	4,43	0,87	12
32	5	40	40	3,96	2,30	12	4,07	1,87	12	4,06	2,06	12	4,41	0,87	12

Ordinaria ogni anno				Milano			Roma			Palermo			Pantelleria		
Test	%leak	Sporc_ max_co	Sporc_ max_ev	SCOP	TEWI	Nman	SCOP	TEWI	Nman	SCOP	TEWI	Nman	SCOP	TEWI	Nman
33	10	0	0	4,02	2,68	12	4,13	2,26	12	4,12	2,45	12	4,48	1,28	12
34	10	10	0	4,01	2,69	12	4,12	2,26	12	4,11	2,46	12	4,47	1,28	12
35	10	20	0	4,00	2,69	12	4,11	2,26	12	4,10	2,46	12	4,45	1,28	12
36	10	40	0	3,98	2,70	12	4,09	2,27	12	4,08	2,47	12	4,43	1,28	12
37	10	0	10	4,01	2,69	12	4,13	2,26	12	4,12	2,45	12	4,47	1,28	12
38	10	10	10	4,00	2,69	12	4,12	2,26	12	4,11	2,46	12	4,46	1,28	12
39	10	20	10	3,99	2,69	12	4,11	2,27	12	4,10	2,46	12	4,45	1,28	12
40	10	40	10	3,97	2,70	12	4,09	2,27	12	4,07	2,47	12	4,42	1,28	12
41	10	0	20	4,01	2,69	12	4,12	2,26	12	4,11	2,46	12	4,47	1,28	12
42	10	10	20	4,00	2,69	12	4,11	2,27	12	4,10	2,46	12	4,45	1,28	12
43	10	20	20	3,99	2,70	12	4,10	2,27	12	4,09	2,46	12	4,44	1,28	12
44	10	40	20	3,97	2,71	12	4,08	2,28	12	4,07	2,47	12	4,42	1,28	12
45	10	0	40	4,00	2,69	12	4,11	2,27	12	4,10	2,46	12	4,46	1,28	12
46	10	10	40	3,99	2,70	12	4,10	2,27	12	4,09	2,46	12	4,44	1,28	12
47	10	20	40	3,98	2,70	12	4,09	2,27	12	4,08	2,47	12	4,43	1,28	12
48	10	40	40	3,96	2,71	12	4,07	2,28	12	4,06	2,48	12	4,41	1,28	12
49	20	0	0	3,98	3,53	12	4,09	3,10	12	4,09	3,29	12	4,45	2,11	12
50	20	10	0	3,97	3,53	12	4,08	3,10	12	4,07	3,30	12	4,44	2,11	12
51	20	20	0	3,95	3,54	12	4,07	3,11	12	4,06	3,30	12	4,42	2,11	12
52	20	40	0	3,93	3,55	12	4,05	3,12	12	4,03	3,31	12	4,40	2,11	12
53	20	0	10	3,97	3,53	12	4,09	3,10	12	4,08	3,29	12	4,44	2,11	12
54	20	10	10	3,96	3,54	12	4,08	3,10	12	4,07	3,30	12	4,43	2,11	12
55	20	20	10	3,95	3,54	12	4,07	3,11	12	4,06	3,31	12	4,42	2,11	12
56	20	40	10	3,92	3,55	12	4,04	3,12	12	4,03	3,32	12	4,39	2,11	12
57	20	0	20	3,97	3,53	12	4,08	3,10	12	4,08	3,30	12	4,44	2,11	12
58	20	10	20	3,96	3,54	12	4,07	3,11	12	4,06	3,30	12	4,43	2,11	12
59	20	20	20	3,94	3,55	12	4,06	3,11	12	4,05	3,31	12	4,41	2,11	12
60	20	40	20	3,92	3,56	12	4,04	3,12	12	4,02	3,32	12	4,38	2,11	12
61	20	0	40	3,96	3,54	12	4,08	3,11	12	4,07	3,30	12	4,43	2,11	12
62	20	10	40	3,95	3,54	12	4,06	3,11	12	4,05	3,31	12	4,41	2,11	12
63	20	20	40	3,93	3,55	12	4,05	3,11	12	4,04	3,31	12	4,40	2,11	12
64	20	40	40	3,91	3,56	12	4,03	3,12	12	4,01	3,32	12	4,37	2,11	12

In Fig. 16 si riporta la percentuale di scenari le cui performance (SCOP) risultano penalizzate per più del 5%, 10% e 15% in funzione della condizione climatica e della strategia di manutenzione adottata. Si nota come, in caso di manutenzione non pianificata, circa l'80% degli scenari è caratterizzato da una penalizzazione dello SCOP superiore al 15%, percentuale ridotta al 30% in caso di manutenzione ogni 4 anni e a 0% ogni 2 anni.

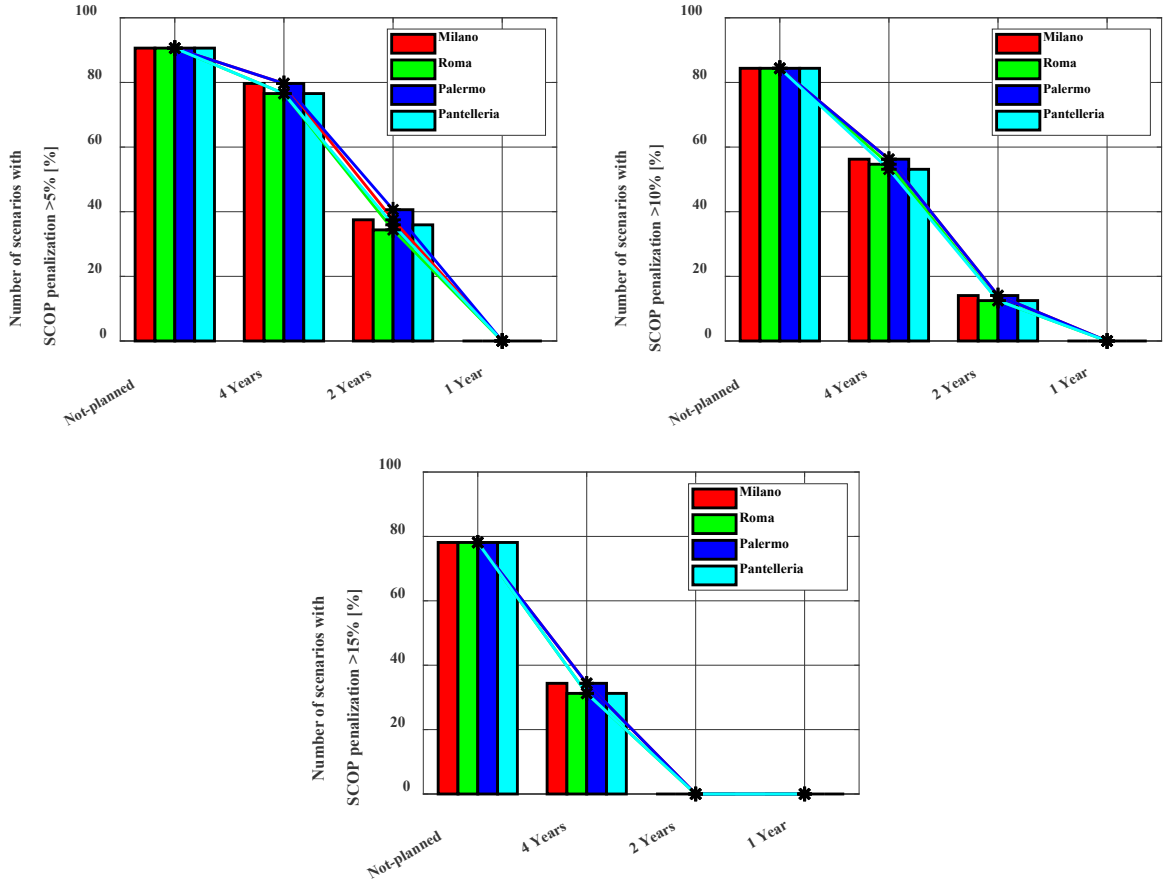

Fig. 16 – Modalità cooling: Percentuale di scenari le cui performance sono significativamente penalizzate, in funzione della condizione climatica e strategia di manutenzione. Scenari di penalizzazione oltre il 5% sullo SCOP (in alto a sx); scenari di penalizzazione oltre il 10% sullo SCOP (in alto a dx); scenari di penalizzazione oltre il 15% sullo SCOP (in basso)

7.4 Risultati in modalità di funzionamento estiva ed invernale

In questa sezione sono riportati i risultati relativi al funzionamento reversibile in heating e cooling, in termini di piani termodinamici (7.4.1), mappe di funzionamento in condizioni attuali (7.4.2) e simulazioni stagionali (7.4.3)

7.4.1 Piani in condizioni nominali in modalità riscaldamento

In Fig. 17 sono riportati i piani termodinamici T-s e P-h ottenuti per le condizioni fissate di $T_{amb} = 7°C$ e $T_{indoor} = 20°C$, in condizioni senza guasto (cicli in linea continua) e di guasto (cicli in linea tratteggiata) in caso di 40% sporcamento scambiatori e perdita di refrigerante standalone. Da queste si deducono tutte le variazioni in termini di temperature e pressioni del refrigerante e dei fluidi secondari tra i cicli termodinamici ottenuti con e senza guasti.

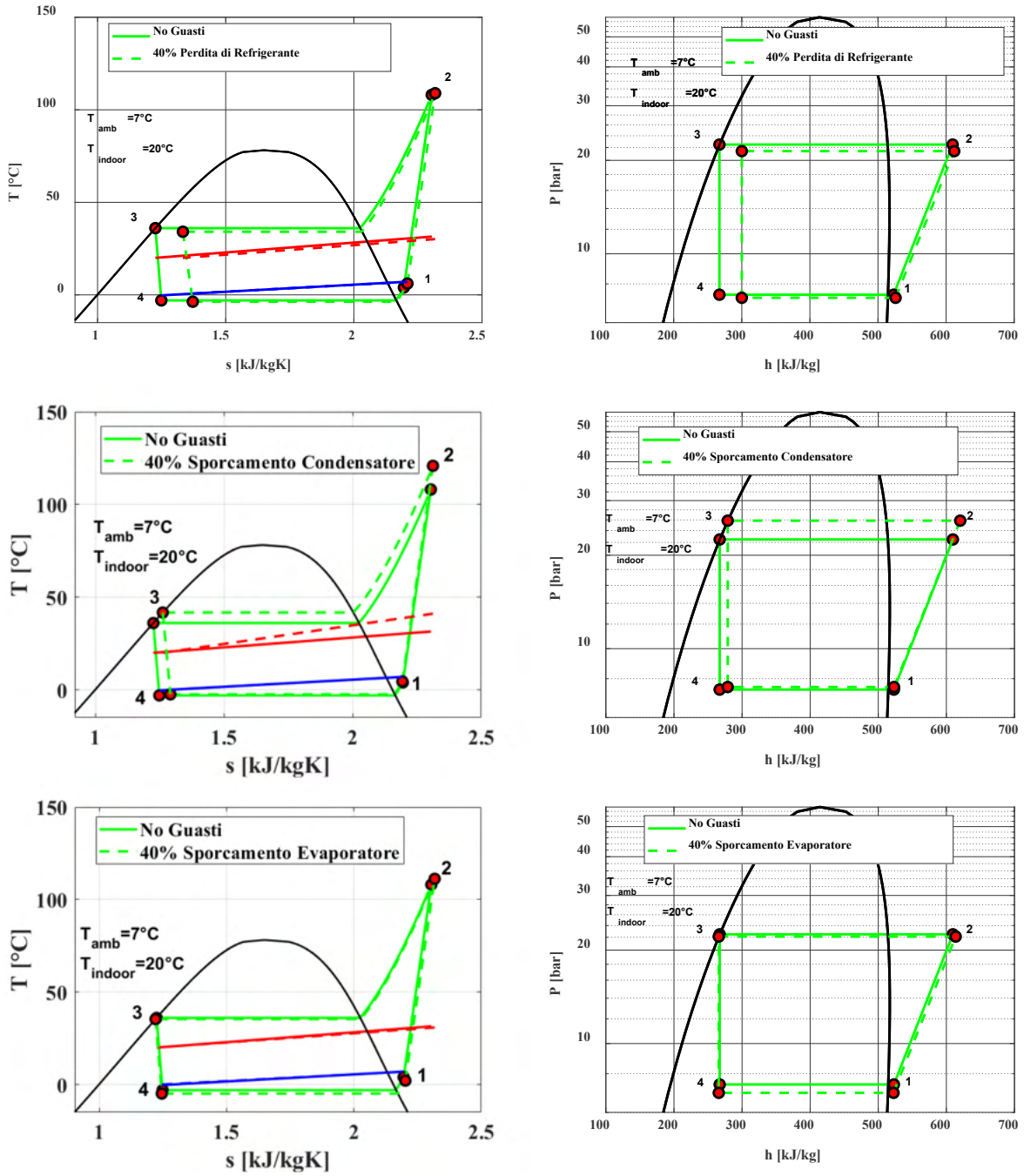

Fig. 17 – Modalità heating+ cooling: Diagrammi termodinamici temperatura-entropia specifica (sx) e pressione-entalpia specifica per condizioni nominali e differenti guasti: 40% perdita di refrigerante (in alto); 40% sporcamento condensatore (al centro); 40% sporcamento evaporatore (in basso)

7.4.2 Mappe di performance in modalità riscaldamento

In questa sezione sono riportate le mappe di resa termica ($\dot{Q}_{co}$) (Fig. 18) e di COP (Fig. 19) in funzione della temperatura ambiente e dell'intensità di guasto, per guasti standalone. I grafici 3D invece mostrano le iso-superfici di resa termica e COP, per condizioni al contorno fissate ($T_{amb} = 7°C$, $T_{indoor} = 20°C$) in caso di guasti simultanei. L'effetto dello sporcamento al condensatore del funzionamento in heating è abbastanza simile rispetto al caso cooling. Lo sporcamento all'evaporatore invece quasi non influenza le performance e la resa, a causa del fatto che l'unità esterna, dimensionata per funzionare anche come condensatore in modalità cooling, risulta sovradimensionata per la modalità heating. In modo analogo, anche la perdita di refrigerante sembra avere una minore influenza rispetto alla modalità cooling dato che, a causa delle densità del ciclo termodinamico globalmente più basse rispetto al caso cooling, la carica di refrigerante richiesta dal sistema è più bassa. Per questo, a parità di carica totale presente nell'impianto, aumenta la zona di indeterminazione in cui, nonostante l'impianto subisce una perdita di refrigerante, questa non è tale da svuotare completamente il ricevitore di liquido e che quindi la perdita non influenza in alcun modo le performance e il funzionamento del sistema.

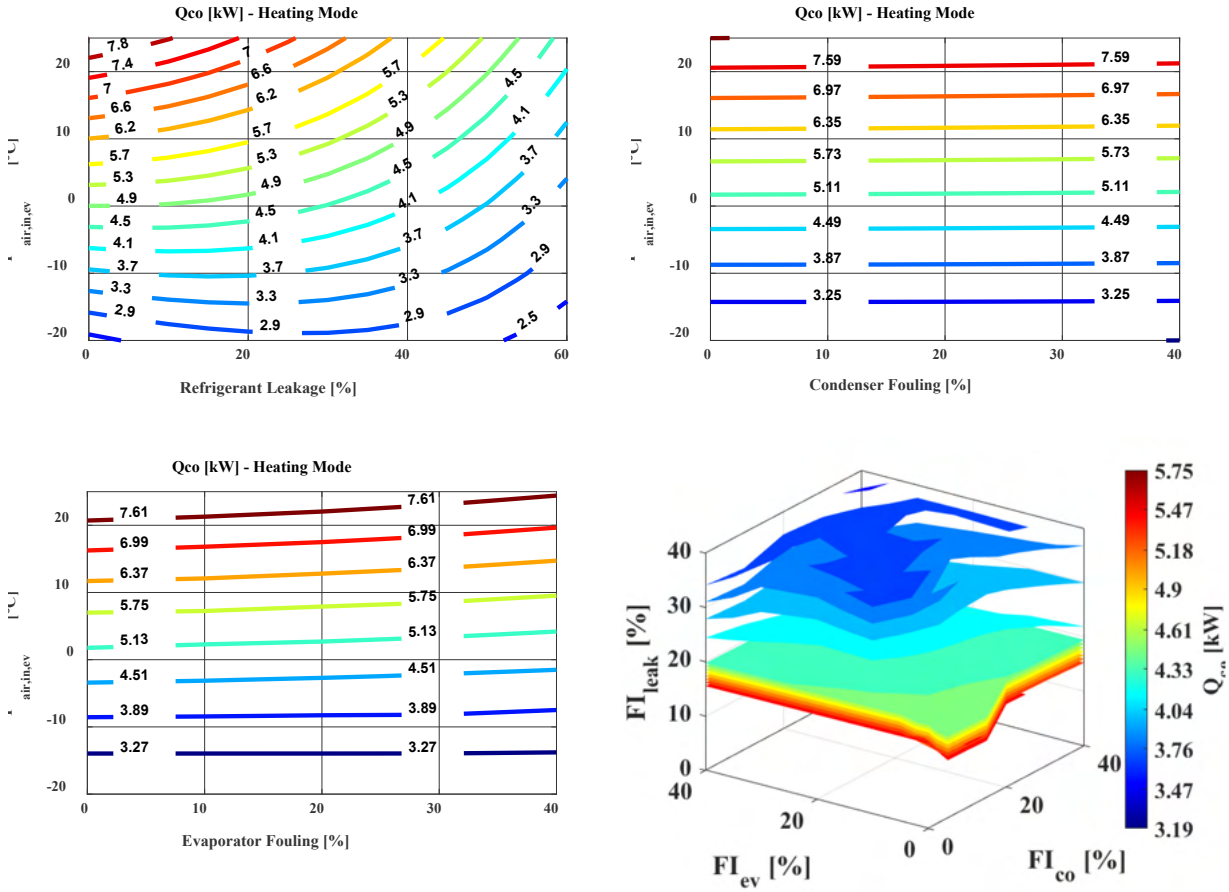

Fig. 18 - Mappe di funzionamento in termini di resa al condensatore per differenti valori della temperatura ambiente ed intensità di guasto. Effetto della perdita di refrigerante (in alto a sx); effetto dello sporcamento al condensatore (in alto a dx); effetto dello sporcamento all'evaporatore (in basso a sx); effetto combinato dei 3 guasti

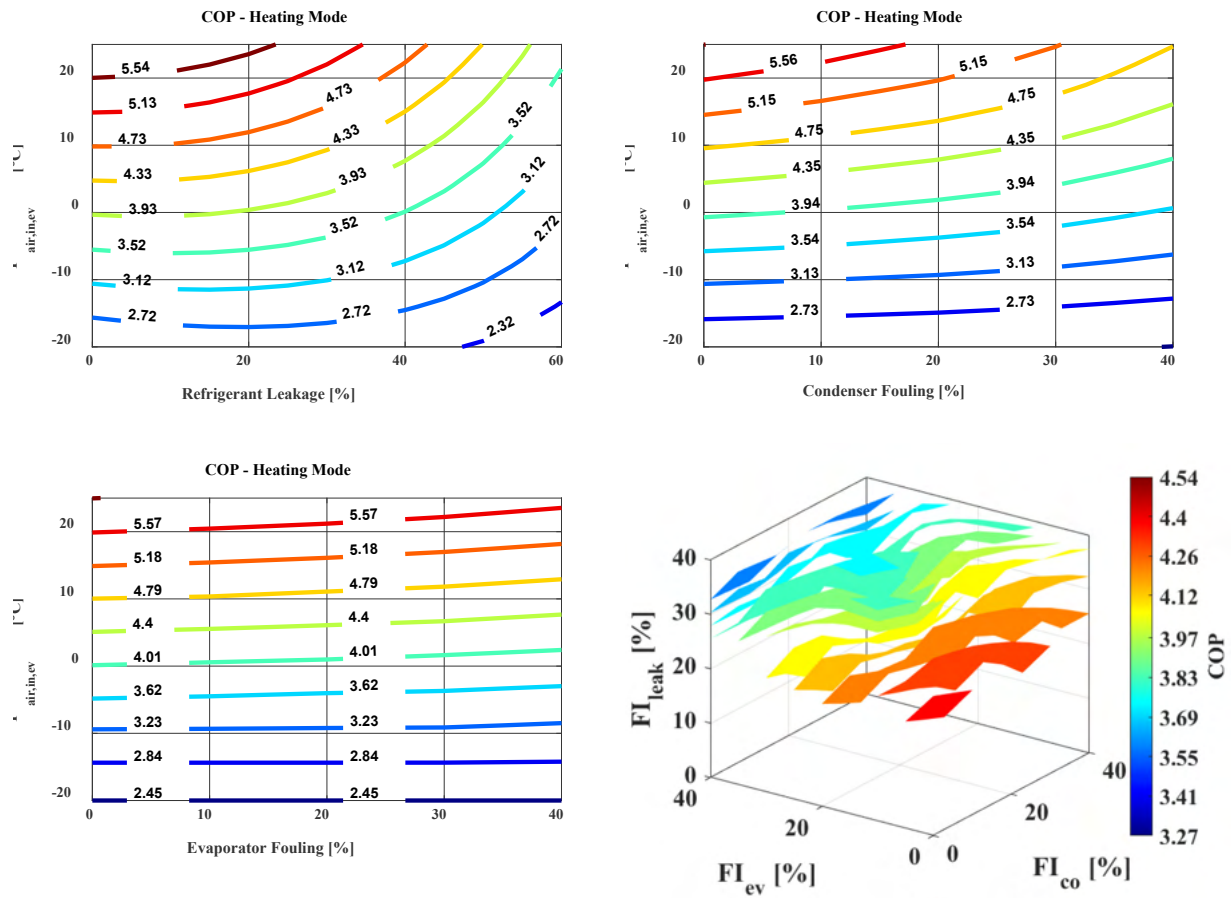

Fig. 19 - Mappe di funzionamento in termini di COP in modalità heating per differenti valori della temperatura ambiente ed intensità di guasto. Effetto della perdita di refrigerante (in alto a sx); effetto dello sporcamento al condensatore (in alto a dx); effetto dello sporcamento all'evaporatore (in basso a sx); effetto combinato dei 3 guasti

7.4.3 Analisi stagionali di SCOP e TEWI

In Fig. 20-24 sono riportati i risultati in termini di degradazione del COP in funzione del numero di anni per la modalità reversibile heating + cooling. In questo caso i risultati sono ottenuti per tutti e 5 i climi di riferimento analizzati, per una perdita di refrigerante del 10%/anno, uno sporcamento massimo al condensatore del 40% e all'evaporatore del 20%, in caso di manutenzione non programmata (figure sx) e ordinaria ogni 2 anni (figure dx). Globalmente, nel passaggio da una manutenzione non programmata ad una ordinaria ogni 2 anni si ottiene un vantaggio sullo SCOP del circa 10-20% e sul TEWI del circa 10-15% per tutti i climi analizzati.

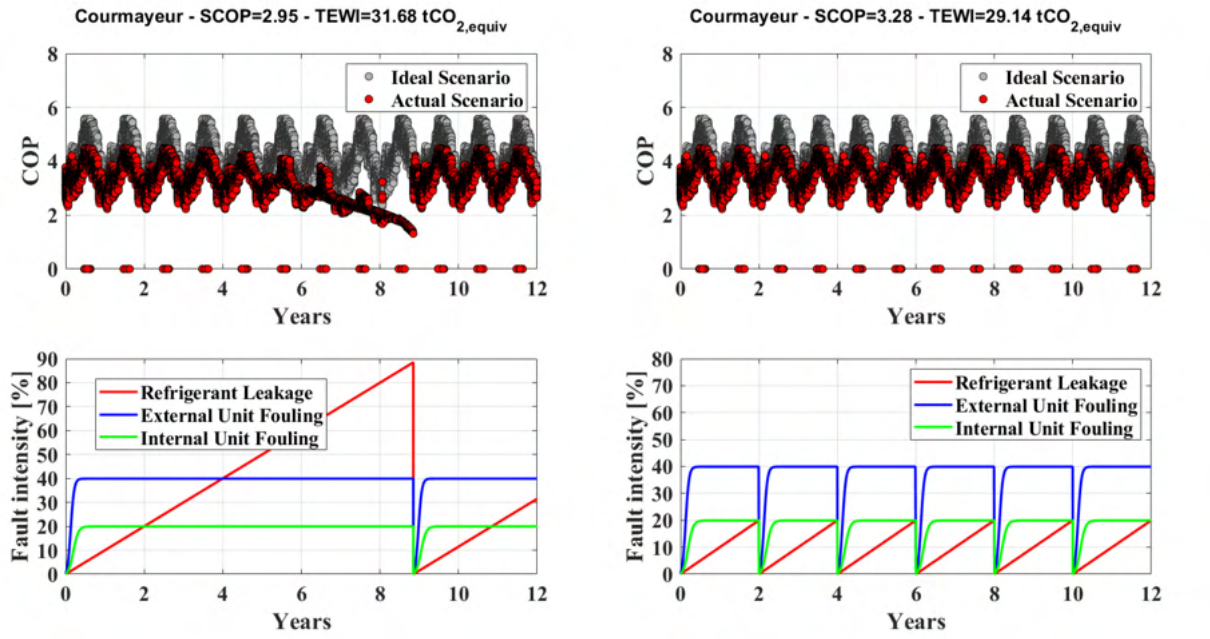

Fig. 20 - Degradazione del COP nel tempo in funzionamento heating+cooling considerando una perdita di refrigerante del 10%/annuo, uno sporcamento al condensatore massimo del 40% ed all'evaporatore del 20%, nel caso di manutenzione non programmata (a sx) e programmata ogni 2 anni (a dx) per la località climatica Courmayeur

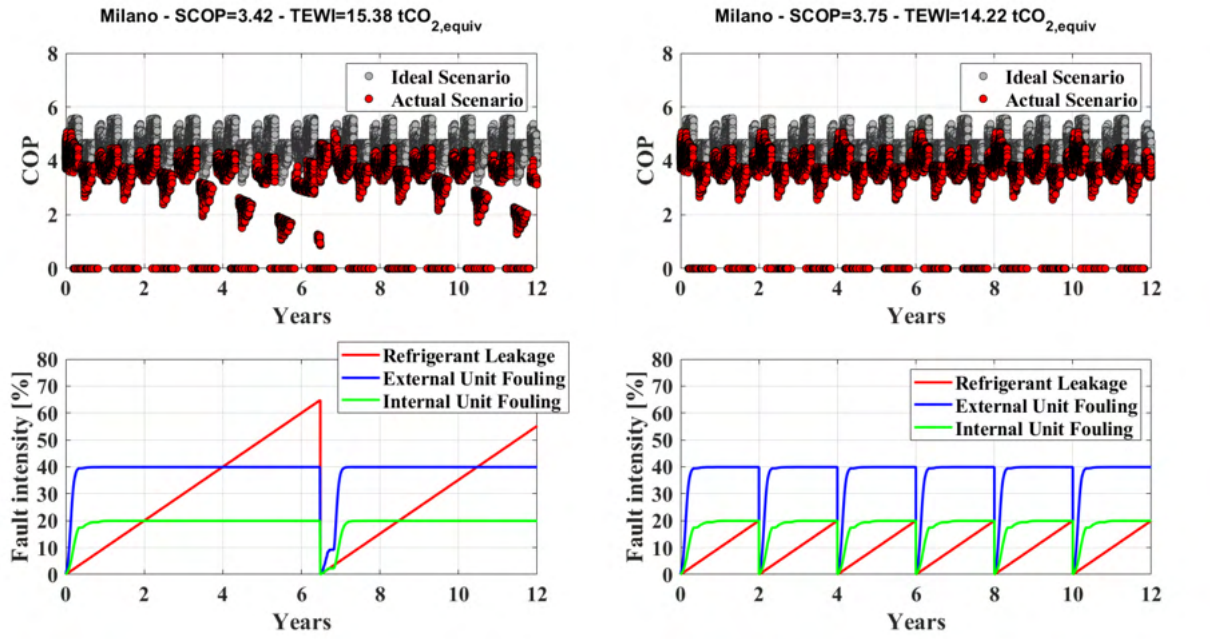

Fig. 21 - Degradazione del COP nel tempo in funzionamento heating+cooling considerando una perdita di refrigerante del 10%/annuo, uno sporcamento al condensatore massimo del 40% ed all'evaporatore del 20%, nel caso di manutenzione non programmata (a sx) e programmata ogni 2 anni (a dx) per la località climatica Milano

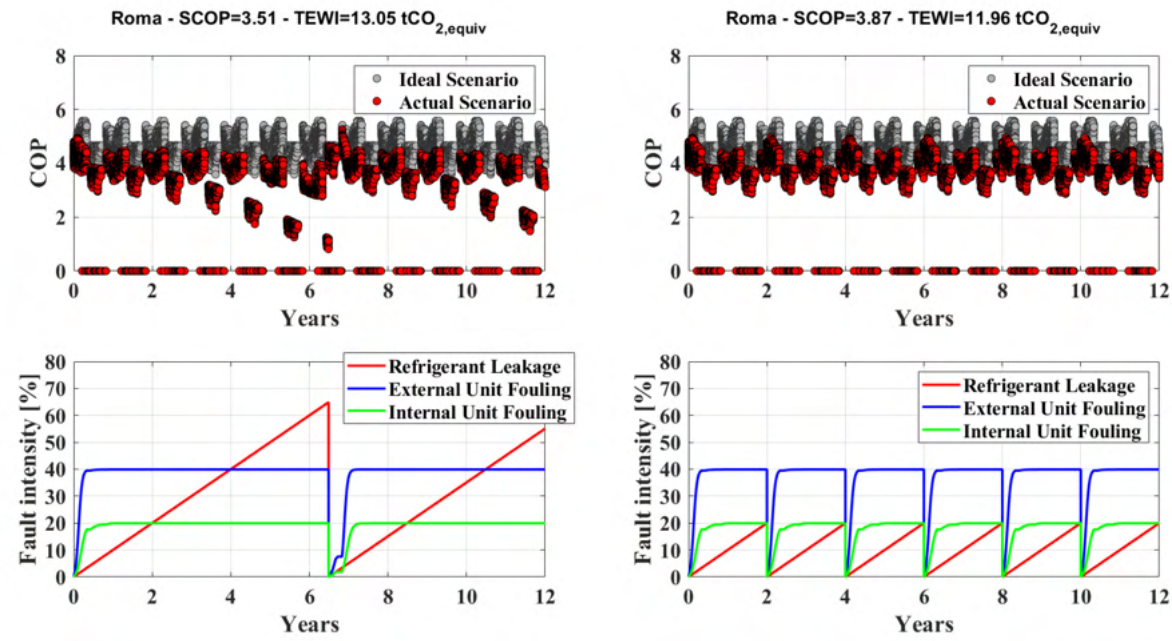

Fig. 22 - Degradazione del COP nel tempo in funzionamento heating+cooling considerando una perdita di refrigerante del 10%/annuo, uno sporcamento al condensatore massimo del 40% ed all'evaporatore del 20%, nel caso di manutenzione non programmata (a sx) e programmata ogni 2 anni (a dx) per la località climatica Roma

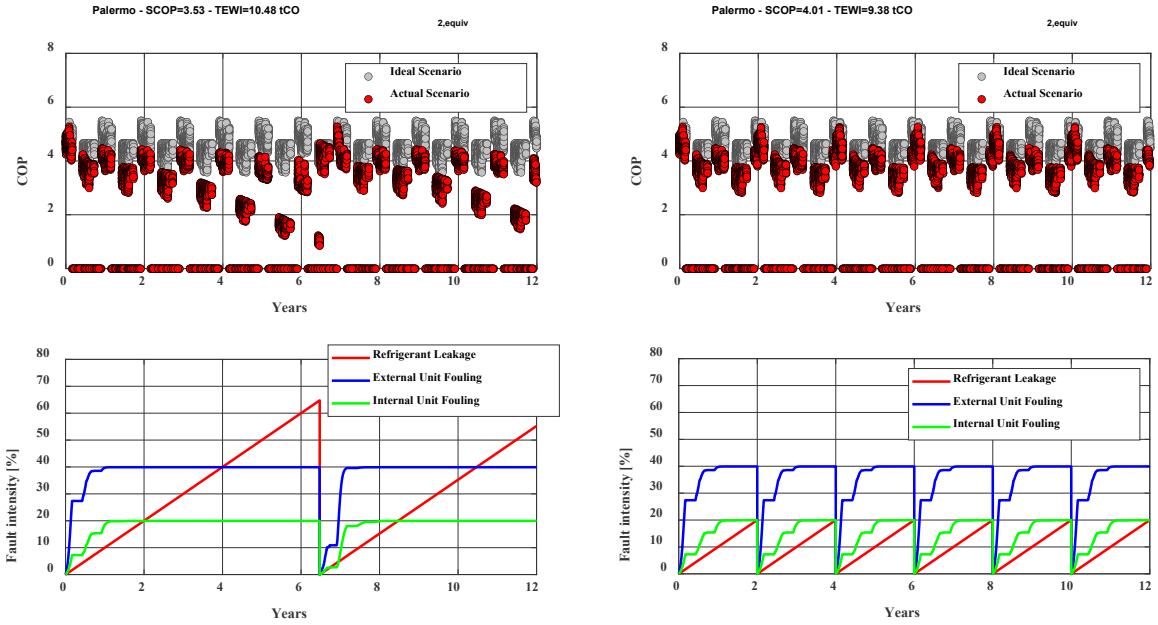

Fig. 23 - Degradazione del COP nel tempo in funzionamento heating+cooling considerando una perdita di refrigerante del 10%/annuo, uno sporcamento al condensatore massimo del 40% ed all'evaporatore del 20%, nel caso di manutenzione non programmata (a sx) e programmata ogni 2 anni (a dx) per la località climatica Palermo

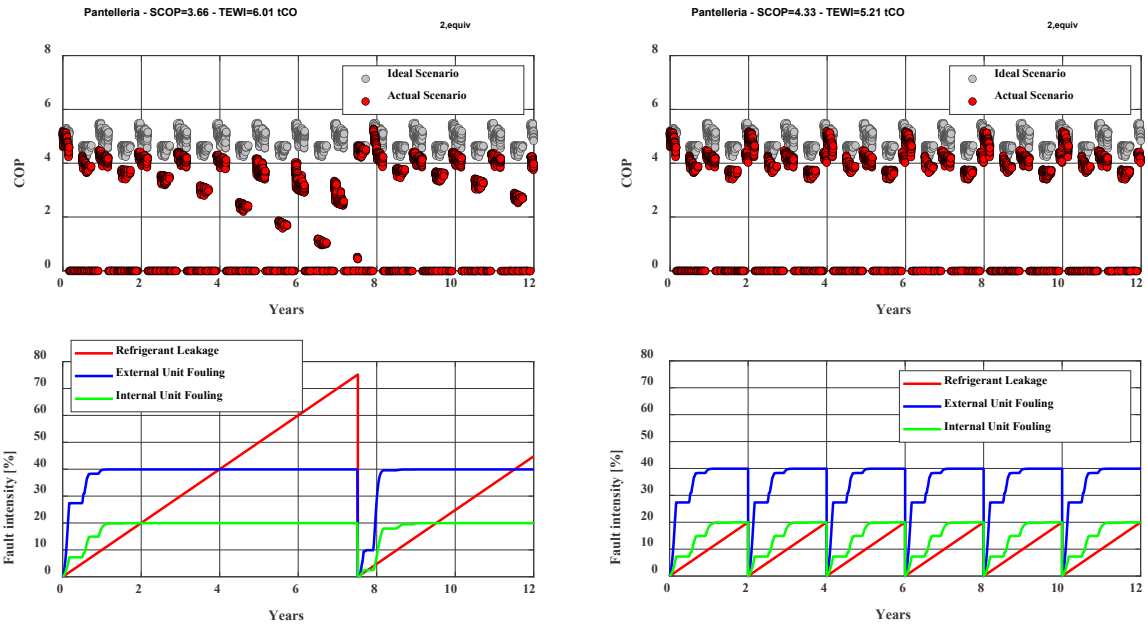

Fig. 24 - Degradazione del COP nel tempo in funzionamento heating+cooling considerando una perdita di refrigerante del 10%/annuo, uno sporcamento al condensatore massimo del 40% ed all'evaporatore del 20%, nel caso di manutenzione non programmata (a sx) e programmata ogni 2 anni (a dx) per la località climatica Pantelleria

Tutti i risultati in termini di SCOP, TEWI e numero di interventi di manutenzione, per tutti e 64 gli scenari simulati per ciascun clima e strategia di manutenzione adottata sono riportati nelle tabelle riepilogative Tab. 9-12. In questa modalità di funzionamento si nota come nel caso di guasti simultanei di grande intensità, e senza alcuna manutenzione programmata, si raggiungono penalizzazioni sullo SCOP superiori al 20-30%

Tab. 9 – Risultati complessivi in modalità heating+cooling nel caso di manutenzione non programmata

Non Programmata				Courmayeur			Milano			Roma			Palermo			Pantelleria		
Test	%leak	Sporc_ max_ext	Sporc_ max_int	SCOP	TEWI	Nman	SCOP	TEWI	Nman	SCOP	TEWI	Nman	SCOP	TEWI	Nman	SCOP	TEWI	Nman
1	0	0	0	3,66	25,39	0	4,32	11,60	0	4,48	9,60	0	4,60	7,45	0	4,98	3,81	0
2	0	10	0	3,60	25,86	0	4,22	11,88	0	4,37	9,84	0	4,48	7,64	0	4,85	3,91	0
3	0	20	0	3,51	26,46	0	4,10	12,24	0	4,24	10,15	0	4,34	7,88	0	4,68	4,05	0
4	0	40	0	3,27	28,44	0	3,74	13,41	0	3,85	11,17	0	3,94	8,69	0	4,20	4,51	0
5	0	0	10	3,64	25,50	0	4,28	11,71	0	4,44	9,69	0	4,56	7,51	0	4,94	3,84	0
6	0	10	10	3,58	25,95	0	4,19	11,99	0	4,34	9,93	0	4,45	7,70	0	4,81	3,94	0
7	0	20	10	3,50	26,53	0	4,07	12,34	0	4,21	10,23	0	4,31	7,95	0	4,65	4,08	0
8	0	40	10	3,26	28,51	0	3,71	13,51	0	3,83	11,25	0	3,91	8,76	0	4,18	4,54	0
9	0	0	20	3,62	25,66	0	4,23	11,85	0	4,39	9,81	0	4,50	7,62	0	4,88	3,88	0
10	0	10	20	3,56	26,10	0	4,14	12,11	0	4,29	10,04	0	4,39	7,80	0	4,75	3,99	0
11	0	20	20	3,49	26,67	0	4,03	12,46	0	4,16	10,34	0	4,26	8,05	0	4,60	4,12	0
12	0	40	20	3,25	28,60	0	3,68	13,63	0	3,79	11,35	0	3,87	8,85	0	4,14	4,58	0
13	0	0	40	3,55	26,15	0	4,09	12,25	0	4,24	10,14	0	4,34	7,90	0	4,73	4,01	0
14	0	10	40	3,50	26,56	0	4,01	12,52	0	4,15	10,37	0	4,24	8,08	0	4,61	4,12	0
15	0	20	40	3,43	27,10	0	3,90	12,86	0	4,03	10,67	0	4,12	8,32	0	4,46	4,25	0
16	0	40	40	3,20	29,01	0	3,58	14,01	0	3,69	11,66	0	3,76	9,11	0	4,04	4,69	0
17	5	0	0	3,58	26,35	0	4,15	12,48	1	4,16	10,76	1	4,18	8,58	1	4,55	4,58	0
18	5	10	0	3,52	26,81	0	4,04	12,81	1	4,02	11,11	1	4,03	8,90	1	4,42	4,71	0
19	5	20	0	3,45	27,31	0	3,94	13,12	1	3,94	11,32	1	3,95	9,05	1	4,32	4,80	0
20	5	40	0	3,22	29,25	0	3,59	14,34	1	3,57	12,44	1	3,55	10,03	1	3,90	5,28	0
21	5	0	10	3,56	26,48	0	4,13	12,54	1	4,11	10,86	0	4,14	8,67	0	4,55	4,58	0
22	5	10	10	3,50	26,98	0	4,00	12,93	1	3,93	11,34	0	3,93	9,09	0	4,37	4,75	0
23	5	20	10	3,44	27,46	0	3,91	13,22	1	3,87	11,52	0	3,88	9,22	0	4,29	4,84	0
24	5	40	10	3,21	29,36	0	3,56	14,48	1	3,51	12,66	0	3,49	10,20	0	3,88	5,30	0
25	5	0	20	3,54	26,67	0	4,01	12,89	1	4,08	10,94	0	4,10	8,74	0	4,52	4,61	0
26	5	10	20	3,48	27,09	0	3,89	13,28	1	3,93	11,34	0	3,95	9,05	0	4,33	4,79	0
27	5	20	20	3,41	27,64	0	3,78	13,64	1	3,83	11,64	0	3,84	9,31	0	4,25	4,88	0
28	5	40	20	3,20	29,45	0	3,48	14,78	1	3,50	12,67	0	3,50	10,16	0	3,85	5,34	0
29	5	0	40	3,47	27,15	0	3,90	13,24	1	3,97	11,24	0	3,99	8,97	0	4,40	4,72	0
30	5	10	40	3,41	27,62	0	3,78	13,66	1	3,82	11,67	0	3,84	9,31	0	4,20	4,93	0
31	5	20	40	3,35	28,16	0	3,69	13,96	1	3,74	11,90	0	3,75	9,52	0	4,13	5,00	0
32	5	40	40	3,15	29,93	0	3,40	15,12	1	3,42	12,98	0	3,42	10,40	0	3,75	5,47	0

Non Programmata				Courmayeur			Milano			Roma			Palermo			Pantelleria		
Test	%leak	Sporc_ max_ext	Sporc_ max_int	SCOP	TEWI	Nman	SCOP	TEWI	Nman	SCOP	TEWI	Nman	SCOP	TEWI	Nman	SCOP	TEWI	Nman
33	10	0	0	3,22	29,13	1	4,07	13,10	2	4,13	11,21	1	4,17	9,00	1	4,31	5,22	1
34	10	10	0	3,18	29,47	1	3,94	13,50	2	3,98	11,62	1	4,00	9,35	1	4,13	5,41	1
35	10	20	0	3,14	29,88	1	3,86	13,75	2	3,91	11,80	1	3,94	9,48	1	4,09	5,46	1
36	10	40	0	2,98	31,49	1	3,53	14,96	2	3,54	12,94	1	3,53	10,47	1	3,71	5,94	1
37	10	0	10	3,21	29,25	1	4,05	13,14	2	4,12	11,25	1	4,16	9,02	1	4,32	5,22	1
38	10	10	10	3,16	29,64	1	3,89	13,65	2	3,93	11,75	1	3,94	9,46	1	4,08	5,47	1
39	10	20	10	3,12	30,02	1	3,82	13,89	2	3,87	11,92	1	3,90	9,57	1	4,05	5,51	1
40	10	40	10	2,96	31,59	1	3,50	15,08	2	3,51	13,04	1	3,51	10,53	1	3,68	5,97	1
41	10	0	20	3,18	29,44	1	3,95	13,45	1	4,08	11,33	1	4,12	9,09	1	4,28	5,26	1
42	10	10	20	3,15	29,75	1	3,81	13,90	1	3,93	11,75	1	3,97	9,41	1	4,05	5,50	1
43	10	20	20	3,10	30,16	1	3,71	14,24	1	3,83	12,03	1	3,86	9,65	1	4,02	5,55	1
44	10	40	20	2,95	31,68	1	3,42	15,38	1	3,51	13,05	1	3,53	10,48	1	3,66	6,01	1
45	10	0	40	3,13	29,84	1	3,84	13,80	1	3,97	11,62	1	4,02	9,31	1	4,16	5,38	1
46	10	10	40	3,10	30,14	1	3,70	14,27	1	3,81	12,08	1	3,84	9,70	1	3,95	5,62	1
47	10	20	40	3,05	30,58	1	3,63	14,54	1	3,74	12,28	1	3,76	9,89	1	3,93	5,65	1
48	10	40	40	2,91	32,05	1	3,34	15,72	1	3,43	13,34	1	3,43	10,74	1	3,57	6,14	1
49	20	0	0	3,23	29,38	2	3,86	14,49	3	3,98	12,41	3	4,03	10,07	3	4,04	6,34	3
50	20	10	0	3,16	29,88	2	3,68	15,14	3	3,77	12,99	3	3,81	10,56	3	3,83	6,60	3
51	20	20	0	3,11	30,26	2	3,64	15,26	3	3,75	13,06	3	3,80	10,58	3	3,64	6,85	2
52	20	40	0	2,94	31,78	2	3,34	16,48	3	3,41	14,21	3	3,41	11,60	3	3,31	7,37	2
53	20	0	10	3,16	29,65	2	3,85	14,52	3	3,97	12,41	3	4,03	10,06	3	3,81	6,63	2
54	20	10	10	3,12	30,06	2	3,64	15,28	3	3,73	13,12	3	3,76	10,67	3	3,54	7,00	2
55	20	20	10	3,08	30,39	2	3,61	15,39	3	3,71	13,18	3	3,76	10,68	3	3,61	6,89	2
56	20	40	10	2,94	31,76	2	3,32	16,59	3	3,38	14,30	3	3,39	11,66	3	3,29	7,41	2
57	20	0	20	3,16	29,60	2	3,82	14,62	3	3,94	12,49	3	4,00	10,12	3	3,78	6,66	2
58	20	10	20	3,09	30,19	2	3,64	15,27	3	3,74	13,09	3	3,79	10,59	3	3,52	7,03	2
59	20	20	20	3,07	30,35	2	3,58	15,50	3	3,68	13,27	3	3,73	10,74	3	3,59	6,93	2
60	20	40	20	2,93	31,73	2	3,31	16,62	3	3,38	14,29	3	3,42	11,56	3	3,27	7,44	2
61	20	0	40	3,10	30,07	2	3,72	14,96	3	3,84	12,78	3	3,91	10,31	3	3,70	6,78	2
62	20	10	40	3,05	30,54	2	3,55	15,62	3	3,63	13,41	3	3,69	10,83	3	3,46	7,13	2
63	20	20	40	3,02	30,80	2	3,51	15,78	3	3,60	13,50	3	3,66	10,91	3	3,52	7,03	2
64	20	40	40	2,87	32,28	2	3,24	16,91	3	3,31	14,56	3	3,34	11,77	3	3,19	7,58	2

Tab. 10 – Risultati complessivi in modalità heating+cooling nel caso di manutenzione programmata ogni 4 anni

Ordinaria ogni 4 anni				Courmayeur			Milano			Roma			Palermo			Pantelleria		
Test	%leak	Sporc_ max_ext	Sporc_ max_int	SCOP	TEWI	Nman	SCOP	TEWI	Nman	SCOP	TEWI	Nman	SCOP	TEWI	Nman	SCOP	TEWI	Nman
1	0	0	0	3,66	25,39	3	4,32	11,60	3	4,48	9,60	3	4,60	7,45	3	4,98	3,81	3
2	0	10	0	3,60	25,84	3	4,23	11,87	3	4,38	9,83	3	4,49	7,62	3	4,86	3,90	3
3	0	20	0	3,52	26,43	3	4,11	12,21	3	4,25	10,12	3	4,37	7,85	3	4,71	4,03	3
4	0	40	0	3,28	28,33	3	3,77	13,31	3	3,89	11,08	3	3,99	8,58	3	4,28	4,43	3
5	0	0	10	3,65	25,50	3	4,29	11,70	3	4,45	9,68	3	4,56	7,51	3	4,95	3,83	3
6	0	10	10	3,58	25,94	3	4,19	11,97	3	4,34	9,91	3	4,46	7,68	3	4,83	3,93	3
7	0	20	10	3,51	26,49	3	4,08	12,30	3	4,22	10,20	3	4,33	7,90	3	4,68	4,05	3
8	0	40	10	3,27	28,40	3	3,74	13,40	3	3,86	11,15	3	3,97	8,64	3	4,25	4,46	3
9	0	0	20	3,62	25,65	3	4,24	11,84	3	4,40	9,79	3	4,51	7,60	3	4,89	3,87	3
10	0	10	20	3,56	26,07	3	4,15	12,09	3	4,30	10,01	3	4,41	7,77	3	4,78	3,97	3
11	0	20	20	3,49	26,62	3	4,04	12,42	3	4,18	10,30	3	4,29	7,99	3	4,63	4,09	3
12	0	40	20	3,26	28,48	3	3,71	13,52	3	3,83	11,25	3	3,93	8,71	3	4,22	4,50	3
13	0	0	40	3,56	26,11	3	4,11	12,21	3	4,26	10,10	3	4,37	7,84	3	4,76	3,99	3
14	0	10	40	3,50	26,52	3	4,02	12,47	3	4,17	10,33	3	4,27	8,01	3	4,65	4,08	3
15	0	20	40	3,44	27,04	3	3,92	12,79	3	4,06	10,61	3	4,16	8,23	3	4,52	4,20	3
16	0	40	40	3,22	28,87	3	3,62	13,87	3	3,73	11,54	3	3,83	8,95	3	4,13	4,59	3
17	5	0	0	3,66	25,79	3	4,31	12,04	3	4,47	10,03	3	4,59	7,88	3	4,98	4,22	3
18	5	10	0	3,60	26,25	3	4,22	12,31	3	4,37	10,27	3	4,48	8,06	3	4,85	4,32	3
19	5	20	0	3,52	26,84	3	4,10	12,66	3	4,24	10,56	3	4,35	8,29	3	4,70	4,45	3
20	5	40	0	3,28	28,74	3	3,76	13,77	3	3,87	11,53	3	3,97	9,03	3	4,27	4,86	3
21	5	0	10	3,65	25,91	3	4,28	12,14	3	4,44	10,11	3	4,55	7,94	3	4,94	4,25	3
22	5	10	10	3,58	26,35	3	4,18	12,41	3	4,33	10,34	3	4,45	8,12	3	4,82	4,35	3
23	5	20	10	3,51	26,90	3	4,07	12,74	3	4,21	10,64	3	4,32	8,34	3	4,67	4,47	3
24	5	40	10	3,27	28,81	3	3,73	13,86	3	3,85	11,60	3	3,95	9,09	3	4,25	4,88	3
25	5	0	20	3,62	26,07	3	4,23	12,27	3	4,39	10,22	3	4,50	8,03	3	4,89	4,29	3
26	5	10	20	3,56	26,49	3	4,14	12,52	3	4,29	10,45	3	4,40	8,21	3	4,77	4,39	3
27	5	20	20	3,49	27,04	3	4,03	12,86	3	4,17	10,74	3	4,27	8,43	3	4,63	4,51	3
28	5	40	20	3,26	28,90	3	3,70	13,97	3	3,81	11,70	3	3,91	9,17	3	4,21	4,92	3
29	5	0	40	3,56	26,53	3	4,10	12,65	3	4,25	10,53	3	4,36	8,27	3	4,75	4,40	3
30	5	10	40	3,50	26,93	3	4,02	12,90	3	4,16	10,76	3	4,26	8,45	3	4,64	4,50	3
31	5	20	40	3,44	27,46	3	3,91	13,24	3	4,05	11,05	3	4,15	8,67	3	4,51	4,62	3
32	5	40	40	3,22	29,29	3	3,61	14,32	3	3,72	11,98	3	3,81	9,39	3	4,12	5,01	3

Ordinaria ogni 4 anni				Courmayeur			Milano			Roma			Palermo			Pantelleria		
Test	%leak	Sporc_ max_ext	Sporc_ max_int	SCOP	TEWI	Nman	SCOP	TEWI	Nman	SCOP	TEWI	Nman	SCOP	TEWI	Nman	SCOP	TEWI	Nman
33	10	0	0	3,66	26,23	3	4,25	12,63	3	4,41	10,59	3	4,50	8,45	3	4,91	4,69	3
34	10	10	0	3,59	26,68	3	4,15	12,90	3	4,31	10,82	3	4,39	8,62	3	4,79	4,78	3
35	10	20	0	3,52	27,26	3	4,04	13,25	3	4,18	11,12	3	4,26	8,86	3	4,64	4,91	3
36	10	40	0	3,28	29,17	3	3,70	14,39	3	3,82	12,11	3	3,89	9,62	3	4,22	5,32	3
37	10	0	10	3,64	26,34	3	4,22	12,71	3	4,38	10,66	3	4,47	8,50	3	4,88	4,71	3
38	10	10	10	3,58	26,79	3	4,12	13,00	3	4,27	10,90	3	4,36	8,68	3	4,76	4,81	3
39	10	20	10	3,51	27,33	3	4,01	13,33	3	4,15	11,19	3	4,24	8,91	3	4,62	4,93	3
40	10	40	10	3,27	29,23	3	3,68	14,47	3	3,79	12,17	3	3,87	9,68	3	4,20	5,34	3
41	10	0	20	3,62	26,49	3	4,18	12,83	3	4,33	10,76	3	4,42	8,57	3	4,84	4,75	3
42	10	10	20	3,56	26,92	3	4,09	13,09	3	4,24	10,98	3	4,32	8,75	3	4,72	4,85	3
43	10	20	20	3,49	27,47	3	3,98	13,44	3	4,12	11,28	3	4,20	8,98	3	4,58	4,97	3
44	10	40	20	3,26	29,32	3	3,65	14,56	3	3,77	12,25	3	3,84	9,74	3	4,17	5,37	3
45	10	0	40	3,56	26,95	3	4,06	13,18	3	4,21	11,05	3	4,30	8,80	3	4,71	4,85	3
46	10	10	40	3,50	27,36	3	3,97	13,44	3	4,12	11,28	3	4,20	8,98	3	4,60	4,94	3
47	10	20	40	3,44	27,88	3	3,87	13,78	3	4,01	11,57	3	4,09	9,21	3	4,47	5,07	3
48	10	40	40	3,22	29,70	3	3,57	14,88	3	3,68	12,52	3	3,76	9,95	3	4,09	5,47	3
49	20	0	0	3,30	29,57	3	4,01	14,15	3	4,14	12,05	3	4,16	9,88	3	4,05	6,34	3
50	20	10	0	3,25	29,92	3	3,86	14,63	3	3,95	12,54	3	3,98	10,24	3	3,84	6,59	3
51	20	20	0	3,20	30,37	3	3,80	14,83	3	3,88	12,72	3	3,93	10,34	3	3,80	6,63	3
52	20	40	0	3,03	31,97	3	3,48	16,03	3	3,53	13,82	3	3,55	11,28	3	3,32	7,35	3
53	20	0	10	3,28	29,71	3	3,99	14,18	3	4,08	12,18	3	4,15	9,88	3	3,76	6,70	3
54	20	10	10	3,23	30,13	3	3,81	14,76	3	3,88	12,71	3	3,91	10,38	3	3,56	6,97	3
55	20	20	10	3,18	30,56	3	3,76	14,96	3	3,83	12,85	3	3,87	10,47	3	3,58	6,94	3
56	20	40	10	3,02	32,13	3	3,45	16,14	3	3,49	13,93	3	3,51	11,38	3	3,31	7,37	3
57	20	0	20	3,25	29,92	3	3,96	14,28	3	4,05	12,25	3	4,10	9,98	3	3,74	6,72	3
58	20	10	20	3,21	30,25	3	3,82	14,75	3	3,88	12,69	3	3,94	10,31	3	3,55	6,99	3
59	20	20	20	3,16	30,73	3	3,72	15,08	3	3,68	13,32	3	3,83	10,55	3	3,56	6,98	3
60	20	40	20	3,00	32,22	3	3,44	16,16	3	3,38	14,33	3	3,52	11,33	3	3,29	7,41	3
61	20	0	40	3,20	30,28	3	3,85	14,61	3	3,84	12,82	3	3,99	10,20	3	3,66	6,82	3
62	20	10	40	3,15	30,70	3	3,72	15,10	3	3,63	13,45	3	3,82	10,57	3	3,48	7,10	3
63	20	20	40	3,10	31,19	3	3,65	15,35	3	3,60	13,55	3	3,75	10,74	3	3,50	7,06	3
64	20	40	40	2,96	32,64	3	3,37	16,48	3	3,31	14,61	3	3,44	11,56	3	3,21	7,54	3

Tab. 11 – Risultati complessivi in modalità heating+cooling nel caso di manutenzione programmata ogni 2 anni

Ordinaria ogni 2 anni				Courmayeur			Milano			Roma			Palermo			Pantelleria		
Test	%leak	Sporc_ max_ext	Sporc_ max_int	SCOP	TEWI	Nman	SCOP	TEWI	Nman	SCOP	TEWI	Nman	SCOP	TEWI	Nman	SCOP	TEWI	Nman
1	0	0	0	3,66	25,39	6	4,32	11,60	6	4,48	9,60	6	4,60	7,45	6	4,98	3,81	6
2	0	10	0	3,60	25,82	6	4,24	11,85	6	4,39	9,81	6	4,51	7,60	6	4,88	3,89	6
3	0	20	0	3,52	26,38	6	4,13	12,16	6	4,27	10,08	6	4,40	7,79	6	4,75	3,99	6
4	0	40	0	3,30	28,16	6	3,81	13,15	6	3,94	10,94	6	4,08	8,40	6	4,39	4,32	6
5	0	0	10	3,65	25,49	6	4,29	11,69	6	4,45	9,68	6	4,57	7,50	6	4,95	3,83	6
6	0	10	10	3,59	25,91	6	4,20	11,94	6	4,36	9,88	6	4,48	7,65	6	4,85	3,91	6
7	0	20	10	3,52	26,44	6	4,10	12,24	6	4,24	10,15	6	4,37	7,84	6	4,73	4,01	6
8	0	40	10	3,29	28,23	6	3,79	13,24	6	3,91	11,01	6	4,05	8,45	6	4,37	4,34	6
9	0	0	20	3,62	25,64	6	4,25	11,81	6	4,40	9,77	6	4,53	7,57	6	4,91	3,86	6
10	0	10	20	3,57	26,04	6	4,16	12,05	6	4,31	9,98	6	4,44	7,72	6	4,81	3,94	6
11	0	20	20	3,50	26,56	6	4,06	12,35	6	4,20	10,24	6	4,33	7,91	6	4,69	4,04	6
12	0	40	20	3,28	28,31	6	3,76	13,34	6	3,88	11,09	6	4,02	8,51	6	4,34	4,37	6
13	0	0	40	3,57	26,06	6	4,13	12,15	6	4,28	10,05	6	4,41	7,76	6	4,81	3,94	6
14	0	10	40	3,51	26,45	6	4,05	12,38	6	4,20	10,25	6	4,33	7,91	6	4,71	4,02	6
15	0	20	40	3,45	26,95	6	3,95	12,68	6	4,09	10,51	6	4,23	8,10	6	4,60	4,12	6
16	0	40	40	3,24	28,67	6	3,67	13,66	6	3,79	11,35	6	3,94	8,69	6	4,26	4,45	6
17	5	0	0	3,66	25,79	6	4,32	12,02	6	4,48	10,02	6	4,60	7,86	6	4,98	4,22	6
18	5	10	0	3,60	26,23	6	4,23	12,26	6	4,39	10,23	6	4,51	8,02	6	4,88	4,30	6
19	5	20	0	3,52	26,78	6	4,12	12,58	6	4,27	10,50	6	4,39	8,21	6	4,75	4,40	6
20	5	40	0	3,30	28,58	6	3,81	13,58	6	3,93	11,36	6	4,07	8,83	6	4,39	4,74	6
21	5	0	10	3,65	25,91	6	4,29	12,11	6	4,45	10,09	6	4,57	7,91	6	4,95	4,24	6
22	5	10	10	3,59	26,32	6	4,20	12,35	6	4,35	10,30	6	4,48	8,06	6	4,85	4,32	6
23	5	20	10	3,52	26,85	6	4,10	12,66	6	4,24	10,56	6	4,37	8,26	6	4,73	4,43	6
24	5	40	10	3,29	28,64	6	3,78	13,67	6	3,91	11,43	6	4,05	8,88	6	4,37	4,76	6
25	5	0	20	3,62	26,05	6	4,25	12,23	6	4,40	10,19	6	4,52	7,98	6	4,91	4,27	6
26	5	10	20	3,57	26,45	6	4,16	12,46	6	4,31	10,39	6	4,44	8,13	6	4,81	4,35	6
27	5	20	20	3,50	26,97	6	4,06	12,77	6	4,20	10,66	6	4,33	8,33	6	4,69	4,46	6
28	5	40	20	3,28	28,73	6	3,75	13,77	6	3,88	11,52	6	4,02	8,94	6	4,34	4,78	6
29	5	0	40	3,57	26,48	6	4,13	12,57	6	4,28	10,47	6	4,41	8,18	6	4,81	4,36	6
30	5	10	40	3,51	26,87	6	4,05	12,80	6	4,20	10,67	6	4,33	8,33	6	4,71	4,44	6
31	5	20	40	3,45	27,37	6	3,95	13,10	6	4,09	10,93	6	4,23	8,52	6	4,60	4,54	6
32	5	40	40	3,24	29,09	6	3,67	14,09	6	3,79	11,78	6	3,93	9,12	6	4,27	4,86	6

Ordinaria ogni 2 anni				Courmayeur			Milano			Roma			Palermo			Pantelleria		
Test	%leak	Sporc_ max_ext	Sporc_ max_int	SCOP	TEWI	Nman	SCOP	TEWI	Nman	SCOP	TEWI	Nman	SCOP	TEWI	Nman	SCOP	TEWI	Nman
33	10	0	0	3,66	26,21	6	4,32	12,45	6	4,47	10,45	6	4,59	8,29	6	4,98	4,64	6
34	10	10	0	3,60	26,64	6	4,22	12,70	6	4,38	10,66	6	4,49	8,45	6	4,87	4,72	6
35	10	20	0	3,52	27,20	6	4,11	13,02	6	4,26	10,93	6	4,38	8,64	6	4,75	4,82	6
36	10	40	0	3,30	28,99	6	3,80	14,03	6	3,92	11,80	6	4,06	9,27	6	4,38	5,16	6
37	10	0	10	3,65	26,32	6	4,28	12,54	6	4,44	10,52	6	4,56	8,34	6	4,95	4,66	6
38	10	10	10	3,59	26,74	6	4,19	12,79	6	4,35	10,73	6	4,47	8,50	6	4,84	4,74	6
39	10	20	10	3,52	27,26	6	4,09	13,10	6	4,23	11,00	6	4,36	8,69	6	4,72	4,84	6
40	10	40	10	3,29	29,05	6	3,78	14,11	6	3,90	11,87	6	4,04	9,32	6	4,36	5,18	6
41	10	0	20	3,62	26,47	6	4,24	12,66	6	4,40	10,62	6	4,51	8,41	6	4,91	4,69	6
42	10	10	20	3,57	26,87	6	4,16	12,90	6	4,31	10,82	6	4,43	8,57	6	4,81	4,77	6
43	10	20	20	3,50	27,39	6	4,05	13,21	6	4,19	11,09	6	4,32	8,76	6	4,69	4,87	6
44	10	40	20	3,28	29,14	6	3,75	14,22	6	3,87	11,96	6	4,01	9,38	6	4,33	5,21	6
45	10	0	40	3,57	26,89	6	4,12	13,00	6	4,28	10,89	6	4,40	8,61	6	4,80	4,78	6
46	10	10	40	3,51	27,28	6	4,04	13,24	6	4,19	11,10	6	4,32	8,76	6	4,71	4,86	6
47	10	20	40	3,45	27,78	6	3,94	13,54	6	4,09	11,36	6	4,22	8,95	6	4,59	4,96	6
48	10	40	40	3,24	29,50	6	3,66	14,53	6	3,78	12,21	6	3,92	9,56	6	4,26	5,28	6
49	20	0	0	3,66	27,05	6	4,25	13,46	6	4,40	11,43	6	4,49	9,28	6	4,91	5,52	6
50	20	10	0	3,60	27,48	6	4,16	13,71	6	4,31	11,64	6	4,40	9,43	6	4,81	5,60	6
51	20	20	0	3,52	28,03	6	4,05	14,03	6	4,20	11,91	6	4,29	9,63	6	4,68	5,70	6
52	20	40	0	3,30	29,82	6	3,74	15,07	6	3,86	12,80	6	3,97	10,28	6	4,32	6,04	6
53	20	0	10	3,64	27,16	6	4,22	13,53	6	4,38	11,48	6	4,47	9,32	6	4,89	5,54	6
54	20	10	10	3,58	27,58	6	4,13	13,80	6	4,28	11,71	6	4,38	9,48	6	4,78	5,62	6
55	20	20	10	3,51	28,10	6	4,03	14,10	6	4,17	11,97	6	4,27	9,67	6	4,66	5,72	6
56	20	40	10	3,29	29,88	6	3,72	15,13	6	3,84	12,85	6	3,95	10,32	6	4,31	6,06	6
57	20	0	20	3,62	27,30	6	4,19	13,63	6	4,34	11,57	6	4,44	9,37	6	4,85	5,56	6
58	20	10	20	3,57	27,70	6	4,10	13,88	6	4,25	11,78	6	4,35	9,53	6	4,75	5,65	6
59	20	20	20	3,50	28,22	6	4,00	14,20	6	4,14	12,05	6	4,24	9,73	6	4,63	5,75	6
60	20	40	20	3,28	29,97	6	3,70	15,22	6	3,82	12,92	6	3,94	10,36	6	4,28	6,08	6
61	20	0	40	3,57	27,72	6	4,08	13,94	6	4,23	11,82	6	4,34	9,54	6	4,75	5,65	6
62	20	10	40	3,51	28,11	6	4,00	14,19	6	4,14	12,04	6	4,25	9,71	6	4,66	5,72	6
63	20	20	40	3,45	28,61	6	3,90	14,50	6	4,04	12,30	6	4,15	9,90	6	4,54	5,83	6
64	20	40	40	3,24	30,33	6	3,62	15,49	6	3,74	13,16	6	3,86	10,52	6	4,22	6,15	6

Tab. 12 – Risultati complessivi in modalità heating+cooling nel caso di manutenzione programmata ogni anno

Ordinaria ogni anno				Courmayeur			Milano			Roma			Palermo			Pantelleria		
Test	%leak	Sporc_ max_ext	Sporc_ max_int	SCOP	TEWI	Nman	SCOP	TEWI	Nman	SCOP	TEWI	Nman	SCOP	TEWI	Nman	SCOP	TEWI	Nman
1	0	0	0	3,66	25,39	12	4,32	11,60	12	4,48	9,60	12	4,60	7,45	12	4,98	3,81	12
2	0	10	0	3,61	25,78	12	4,25	11,80	12	4,40	9,77	12	4,54	7,55	12	4,92	3,86	12
3	0	20	0	3,54	26,27	12	4,16	12,06	12	4,31	9,99	12	4,46	7,68	12	4,84	3,92	12
4	0	40	0	3,34	27,83	12	3,91	12,84	12	4,04	10,66	12	4,26	8,05	12	4,62	4,10	12
5	0	0	10	3,65	25,48	12	4,30	11,67	12	4,46	9,66	12	4,58	7,48	12	4,97	3,82	12
6	0	10	10	3,59	25,86	12	4,22	11,88	12	4,38	9,83	12	4,52	7,58	12	4,90	3,87	12
7	0	20	10	3,53	26,33	12	4,14	12,13	12	4,29	10,04	12	4,44	7,71	12	4,82	3,93	12
8	0	40	10	3,33	27,89	12	3,88	12,91	12	4,02	10,71	12	4,24	8,08	12	4,61	4,11	12
9	0	0	20	3,63	25,61	12	4,26	11,77	12	4,42	9,73	12	4,56	7,51	12	4,95	3,83	12
10	0	10	20	3,58	25,97	12	4,19	11,96	12	4,35	9,90	12	4,50	7,62	12	4,88	3,88	12
11	0	20	20	3,52	26,44	12	4,11	12,21	12	4,26	10,12	12	4,42	7,74	12	4,81	3,94	12
12	0	40	20	3,32	27,97	12	3,86	13,00	12	3,99	10,78	12	4,22	8,11	12	4,60	4,12	12
13	0	0	40	3,58	25,97	12	4,17	12,03	12	4,33	9,94	12	4,50	7,61	12	4,90	3,87	12
14	0	10	40	3,53	26,32	12	4,10	12,22	12	4,26	10,11	12	4,44	7,71	12	4,84	3,92	12
15	0	20	40	3,47	26,77	12	4,02	12,47	12	4,17	10,32	12	4,37	7,84	12	4,76	3,98	12
16	0	40	40	3,29	28,27	12	3,79	13,25	12	3,92	10,98	12	4,18	8,20	12	4,56	4,16	12
17	5	0	0	3,66	25,80	12	4,32	12,01	12	4,48	10,02	12	4,60	7,86	12	4,98	4,22	12
18	5	10	0	3,61	26,19	12	4,25	12,21	12	4,40	10,19	12	4,54	7,96	12	4,92	4,27	12
19	5	20	0	3,54	26,68	12	4,16	12,47	12	4,31	10,40	12	4,46	8,09	12	4,84	4,33	12
20	5	40	0	3,34	28,24	12	3,90	13,26	12	4,04	11,08	12	4,25	8,46	12	4,63	4,51	12
21	5	0	10	3,65	25,90	12	4,30	12,09	12	4,46	10,07	12	4,58	7,89	12	4,97	4,23	12
22	5	10	10	3,59	26,27	12	4,22	12,29	12	4,38	10,24	12	4,52	7,99	12	4,90	4,28	12
23	5	20	10	3,53	26,74	12	4,14	12,54	12	4,29	10,46	12	4,45	8,12	12	4,82	4,34	12
24	5	40	10	3,33	28,30	12	3,88	13,33	12	4,02	11,13	12	4,24	8,49	12	4,62	4,52	12
25	5	0	20	3,63	26,03	12	4,26	12,18	12	4,42	10,15	12	4,56	7,93	12	4,95	4,25	12
26	5	10	20	3,58	26,39	12	4,19	12,38	12	4,35	10,32	12	4,50	8,03	12	4,88	4,30	12
27	5	20	20	3,52	26,85	12	4,11	12,63	12	4,26	10,53	12	4,42	8,16	12	4,81	4,36	12
28	5	40	20	3,32	28,38	12	3,86	13,42	12	3,99	11,20	12	4,22	8,53	12	4,60	4,53	12
29	5	0	40	3,58	26,38	12	4,17	12,44	12	4,33	10,36	12	4,50	8,02	12	4,90	4,28	12
30	5	10	40	3,53	26,73	12	4,10	12,64	12	4,26	10,52	12	4,44	8,12	12	4,84	4,33	12
31	5	20	40	3,47	27,18	12	4,02	12,88	12	4,17	10,73	12	4,37	8,25	12	4,76	4,39	12

Ordinaria ogni anno				Courmayeur			Milano			Roma			Palermo			Pantelleria		
Test	%leak	Sporc_ max_ext	Sporc_ max_int	SCOP	TEWI	Nman	SCOP	TEWI	Nman	SCOP	TEWI	Nman	SCOP	TEWI	Nman	SCOP	TEWI	Nman
33	10	0	0	3,66	26,21	12	4,32	12,43	12	4,48	10,43	12	4,60	8,28	12	4,98	4,63	12
34	10	10	0	3,61	26,60	12	4,25	12,63	12	4,40	10,60	12	4,54	8,38	12	4,92	4,68	12
35	10	20	0	3,54	27,10	12	4,16	12,89	12	4,31	10,82	12	4,46	8,50	12	4,84	4,74	12
36	10	40	0	3,34	28,66	12	3,90	13,69	12	4,03	11,50	12	4,25	8,89	12	4,62	4,93	12
37	10	0	10	3,65	26,31	12	4,30	12,50	12	4,46	10,49	12	4,58	8,31	12	4,97	4,65	12
38	10	10	10	3,59	26,69	12	4,22	12,70	12	4,38	10,66	12	4,52	8,41	12	4,90	4,70	12
39	10	20	10	3,53	27,16	12	4,14	12,96	12	4,28	10,87	12	4,44	8,53	12	4,83	4,76	12
40	10	40	10	3,33	28,72	12	3,88	13,76	12	4,01	11,55	12	4,23	8,92	12	4,61	4,94	12
41	10	0	20	3,63	26,44	12	4,26	12,59	12	4,42	10,56	12	4,56	8,34	12	4,95	4,66	12
42	10	10	20	3,58	26,80	12	4,19	12,79	12	4,35	10,73	12	4,50	8,44	12	4,88	4,71	12
43	10	20	20	3,52	27,26	12	4,11	13,04	12	4,25	10,95	12	4,42	8,57	12	4,81	4,77	12
44	10	40	20	3,32	28,79	12	3,85	13,84	12	3,99	11,62	12	4,21	8,95	12	4,59	4,95	12
45	10	0	40	3,58	26,79	12	4,17	12,85	12	4,33	10,77	12	4,50	8,44	12	4,90	4,70	12
46	10	10	40	3,53	27,15	12	4,10	13,05	12	4,26	10,94	12	4,44	8,54	12	4,84	4,75	12
47	10	20	40	3,47	27,60	12	4,02	13,30	12	4,17	11,15	12	4,37	8,66	12	4,77	4,80	12
48	10	40	40	3,29	29,10	12	3,78	14,09	12	3,92	11,82	12	4,17	9,04	12	4,56	4,99	12
49	20	0	0	3,66	27,04	12	4,32	13,27	12	4,48	11,27	12	4,59	9,12	12	4,98	5,46	12
50	20	10	0	3,61	27,43	12	4,24	13,48	12	4,40	11,45	12	4,52	9,23	12	4,91	5,52	12
51	20	20	0	3,54	27,92	12	4,15	13,74	12	4,30	11,67	12	4,45	9,36	12	4,83	5,58	12
52	20	40	0	3,34	29,49	12	3,89	14,54	12	4,02	12,35	12	4,24	9,74	12	4,61	5,76	12
53	20	0	10	3,65	27,14	12	4,29	13,35	12	4,45	11,33	12	4,57	9,15	12	4,96	5,48	12
54	20	10	10	3,59	27,52	12	4,22	13,55	12	4,37	11,50	12	4,51	9,26	12	4,89	5,53	12
55	20	20	10	3,53	27,98	12	4,13	13,81	12	4,28	11,72	12	4,43	9,39	12	4,82	5,59	12
56	20	40	10	3,33	29,54	12	3,87	14,61	12	4,01	12,40	12	4,22	9,77	12	4,60	5,77	12
57	20	0	20	3,63	27,27	12	4,26	13,44	12	4,42	11,40	12	4,55	9,18	12	4,94	5,49	12
58	20	10	20	3,58	27,63	12	4,18	13,64	12	4,34	11,57	12	4,48	9,29	12	4,88	5,54	12
59	20	20	20	3,52	28,09	12	4,10	13,89	12	4,25	11,79	12	4,41	9,42	12	4,80	5,60	12
60	20	40	20	3,32	29,62	12	3,85	14,70	12	3,98	12,47	12	4,20	9,80	12	4,59	5,79	12
61	20	0	40	3,58	27,62	12	4,16	13,70	12	4,32	11,61	12	4,49	9,28	12	4,90	5,53	12
62	20	10	40	3,53	27,97	12	4,10	13,90	12	4,25	11,78	12	4,43	9,38	12	4,83	5,58	12
63	20	20	40	3,47	28,43	12	4,01	14,15	12	4,16	12,00	12	4,36	9,51	12	4,76	5,64	12
64	20	40	40	3,29	29,92	12	3,77	14,94	12	3,91	12,67	12	4,16	9,89	12	4,55	5,82	12

Infine, in Fig. 25 si riportano le percentuali di scenari il cui SCOP risulta penalizzato per lo più del 5%, 10% e 15% rispettivamente, in funzione del clima e della strategia di manutenzione adottata. Si nota come, in uno scenario di manutenzione non programmata, la percentuale di scenari il cui SCOP risulta penalizzato di più del 10% è l'80% circa per i climi più caldi di Roma, Palermo e Pantelleria, circa il 60% per i climi più freddi di Courmayeur e Milano, mentre una manutenzione ordinaria ogni 2 anni è in grado di ridurre questa percentuale al circa 20% per tutte le condizioni climatiche.

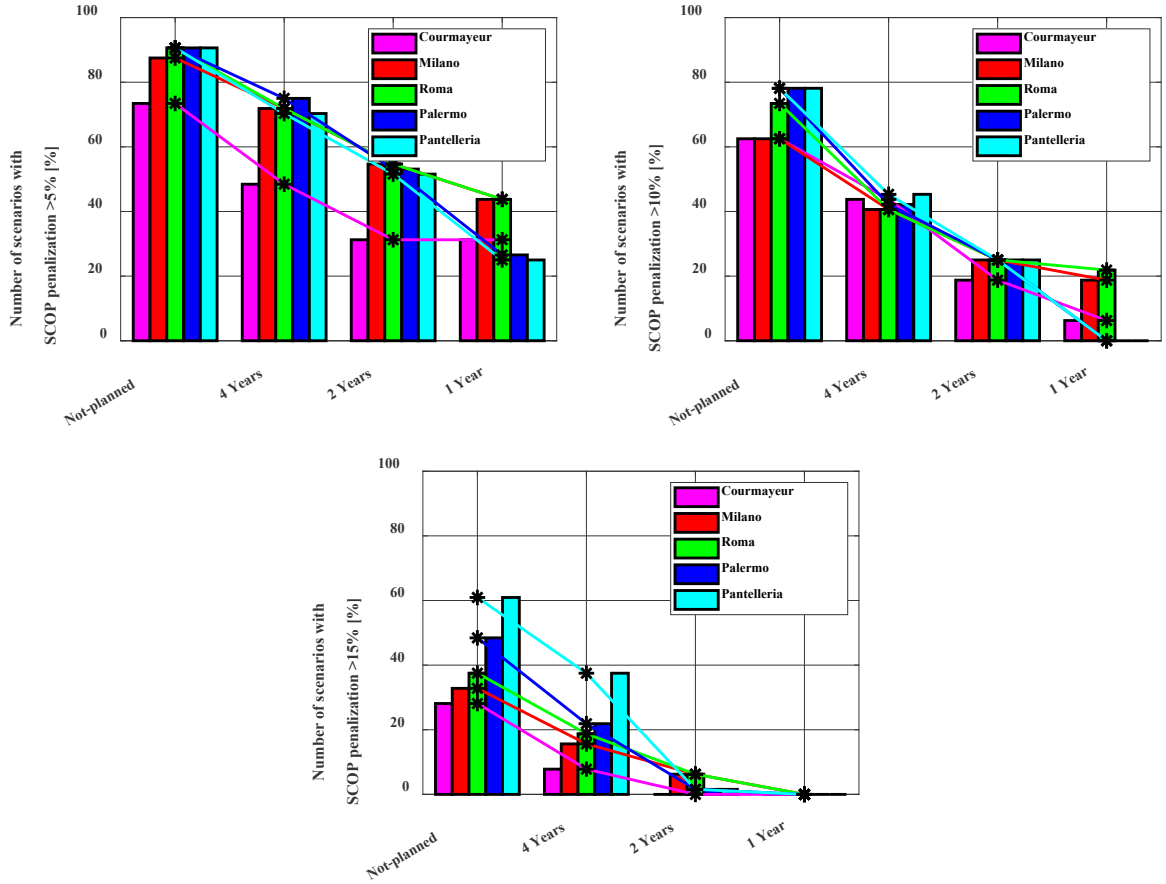

Fig. 25 – Modalità heating+cooling: Percentuale di scenari le cui performance sono significativamente penalizzate, in funzione della condizione climatica e strategia di manutenzione. Scenari di penalizzazione oltre il 5% sullo SCOP (in alto a sx); scenari di penalizzazione oltre il 10% sullo SCOP (in alto a dx); scenari di penalizzazione oltre il 15% sullo SCOP (in basso)

7.4.4 Bibliografia

[1] B. Llopis-Mengual, E. Navarro-Peris, F. Barcelo-Ruescas, J.M. Corberan, Modelling and Simulation of the Impact of Soft Faults in a Reversible Air-to-water Propane Heat Pump, International Refrigeration and Air Conditioning Conference, Purdue.

[2] B. Llopis-Mengual, E. Navarro-Peris, Selection of relevant features to detect and diagnose single and multiple simultaneous soft faults in air-source heat pumps. Applied Thermal Engineering (2023), 121922.

[3] Y. Hu, D. P. Yuill, Effects of multiple simultaneous faults on characteristic fault detection features of a heat pump in cooling mode, Energy & Buildings 251 (2021), 111355.

[4] T.M. Rossi, J.E. Braun, A Statistical, Rule-Based Fault Detection and Diagnostic Method for Vapor Compression Air Conditioners, HVAC&R Research 3 (1997), 19-37.

[5] M.S. Breuker, J.E. Braun, Common Fault and Their Impacts for Rooftop Air Conditioners, HVAC&R Research, 4(1998), 303-318.

[6] F. Pelella, L. Viscito, A.W. Mauro, Combined effects of refrigerant leakages and fouling on air-source heat pump performances in cooling mode, Applied Thermal Engineering 204 (2022), 117965.

[7] F. Pelella , L. Viscito , A.W. Mauro, Soft faults in residential heat pumps: Possibility of evaluation via on-field measurements and related degradation of performance, Energy Conversion and Management 260 (2022), 115646.

[8] A. W. Mauro, F. Pelella, L. Viscito, Performance degradation of air source heat pumps under faulty conditions. Case Studies in Thermal Engineering 45(2023) 103010.

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Nell’ambito della LA 4.14 non è stata effettuata alcuna attività di consulenza.

9 Pubblicazioni scientifiche

- F. Pelella, L. Viscito, A.W. Mauro, Combined effects of refrigerant leakages and fouling on air-source heat pump performances in cooling mode, Applied Thermal Engineering 204 (2022), 117965.
- F. Pelella , L. Viscito , A.W. Mauro, Soft faults in residential heat pumps: Possibility of evaluation via on-field measurements and related degradation of performance, Energy Conversion and Management 260 (2022), 115646.
- A.W. Mauro, F. Pelella, L. Viscito, Performance degradation of air source heat pumps under faulty conditions. Case Studies in Thermal Engineering 45(2023) 103010.

10 Eventi di disseminazione

Nell’ambito della LA 4.14 non è stata effettuato alcun evento di disseminazione.