

POLITECNICO DI TORINO

Corso di laurea magistrale in
INGEGNERIA MECCANICA



TESI DI LAUREA:

“Un sistema di << Air flow management >> per ridurre i consumi in una vettura elettrica con pompa di calore: indagine sperimentale”

RELATORE: Prof. Ing. EZIO SPESSA

RELATORE AZIENDALE: Ing. DOMENICO VITALI

LAUREANDO: STEFANO GRASSO

a.a. 2018-2019

INDICE

INTRODUZIONE	7
CAPITOLO 1	10
SISTEMA POMPA DI CALORE E APPLICAZIONE SUL VEICOLO ELETTRICO RENAUL ZOE	
1.0 FUNZIONAMENTO DELLA POMPA DI CALORE.....	11
1.1 CENNI SUL REFRIGERANTE R1234yf.....	13
1.2 SISTEMA A/C DELLA RENAUL ZOE	15
1.3 FORMAZIONE DI GHIACCIO NEL CONDENSATORE ESTERNO (EVAPORATORE).....	17
1.4 EFFETTI SULLA FORMAZIONE DI GHIACCIO	19
1.5 RENAULT ZOE: PRESENTAZIONE DEL VEICOLO UTILIZZATO PER LO STUDIO DEL SISTEMA A/C	21
1.5.1 BATTERIE	21
1.5.2 INVERTER.....	22
1.5.3 MOTORE R90.....	24
1.5.4 VENTOLA DEL MOTORE ELETTRICO	26
1.5.5 CONTROLLO PWM DELLA VENTOLA	27
1.6 PROVE SPERIMENTALI PER LA CARATTERIZZAZIONE DELLA VENTOLA	30
1.6.1 DESCRIZIONE DELL'AMBIENTE DI LAVORO	30
1.6.2 RISULTATI DELLE PROVE	31
1.6.3 OSSERVAZIONI FINALI	32
CAPITOLO 2	33
PREPARAZIONE DELLE PROVE	
2.0 SCOPO DELLE PROVE.....	34
2.1 MODIFICA SUL VEICOLO	37
2.1.1 FASE PRELIMINARE	37
2.1.2 FASE DI MONTAGGIO	38
2.1.3 OSSERVAZIONI FINALI	40
2.2 PREPARAZIONE PER L'ANALISI	41
2.2.1 SENSORI E TRASDUTTORI	41
2.2.3 SENSORE DI TEMPERATURA (Termocoppia).....	41
2.2.4 TRASDUTTORE DI PRESSIONE	43
2.2.5 SENSORE DI UMIDITA'	44

2.2.6 ANEMOMETRO A FILO CALDO	45
2.2.7 DERIVATORE DI CORRENTE O SHUNT.....	46
2.3 TIPOLOGIA E NUMERO DI PROVE.....	48
CAPITOLO 3	49
PROVE A VELOCITA' COSTANTE	
3.0 PREPARAZIONE PROVE.....	50
3.0.1 MONTAGGIO DELLE SONDE	50
3.0.2 CONDIZIONI DELLE PROVE A VELOCITA' COSTANTE.....	53
3.1 RISULTATI DELLE PROVE A VELOCITA' COSTANTE.....	56
3.1.1 RISULTATI DELLE PROVE A 40 km/h.....	56
3.1.2 RISULTATI DELLE PROVE A 20 km/h.....	58
3.1.3 ANDAMENTO TEMPERATURE DEL MOTORE.....	60
3.2 CONCLUSIONE PRIME PROVE.....	63
CAPITOLO 4	65
PROVE CON CICLO GUIDA	
4.0 INTRODUZIONE DELLE PROVE CON CICLO GUIDA	66
4.0.1 CARATTERISTICHE DELLE PROVE CON CICLO GUIDA	66
4.0.2 CICLO WLTP	67
4.0.3 SCELTA DEL PWM	69
4.1 PREPARAZIONE DELLE PROVE CON CICLO GUIDA	74
4.1.1 DESCRIZIONE DELLE PROVE CON CICLO GUIDA E CONDIZIONI DI PROVA.....	75
4.2 RISULTATI DELLE PROVE IN POMPA DI CALORE.....	77
4.2.1 OSSERVAZIONE SUI RISULTATI.....	80
4.3 RISULTATI DELLA PROVA IN ARIA CONDIZIONATA	80
4.3.1 ASPETTO ENERGETICO	81
4.4 OSSERVAZIONI FINALI DELLE PROVE IN ARIA CONDIZIONATA	86
CAPITOLO 5	87
CONCLUSIONI	
5.0 RIASSUNTO DEI RISULTATI OTTENUTI	88
5.1 CONCLUSIONE E APPLICAZIONI FUTURE.....	89

INTRODUZIONE

Il seguente lavoro di tesi sperimentale è stato svolto presso DENSO Thermal System S.p.a. (Frazione Masio 24 – Poirino). Il veicolo analizzato nelle prove sperimentali è una Renault ZOE di cui è stato dedicato un capitolo per la descrizione delle sue caratteristiche e della componentistica. Tale veicolo è equipaggiato con un sistema pompa di calore sviluppato da Denso Thermal Systems (DNTS), e un motore elettrico sincrono con architettura Gen3 (di serie). Tale motore a differenza del suo predecessore, il motore Q 90, è raffreddato ad aria e, rispetto a quest'ultimo, possiede un vantaggio in termini di peso (tale differenza e il funzionamento sarà argomentato in seguito).

Un problema, comune a tutte le pompe di calore con evaporatore ad aria, è la formazione di uno strato di ghiaccio sul condensatore esterno (esso lavora come evaporatore durante il funzionamento in pompa di calore) dovuto all'umidità dell'aria e alle basse temperature in prossimità di esso. Tale strato di ghiaccio porta alla riduzione dello scambio termico tra aria esterna e refrigerante che passa attraverso l'evaporatore e ciò comporta una riduzione della temperatura e del confort percepito dall'utente in abitacolo. Nel caso del veicolo in esame, essendo il motore elettrico molto più freddo rispetto ad un motore termico (assente da combustione), il fenomeno di ghiacciamento risulta essere ricorrente e, quando si presenta, oltre alla riduzione di performance A/C si ha un incremento dei consumi. Ciò è dovuto al controllo del sistema A/C che agisce per ridurre l'effetto dell'abbassamento della temperatura del refrigerante e per mantenere il giusto confort interno. Tale fenomeno, per questa tipologia di veicoli la cui energia è fornita attraverso le batterie, incide negativamente sull'autonomia di quest'ultime.

Grazie alla presenza dell'architettura Gen3 del motore, descritta in precedenza, si può però sfruttare l'aria mandata dalla ventola di raffreddamento motore (quindi aria ad alta temperatura) per poter ritardare la formazione del ghiaccio, indirizzando tale flusso in prossimità del condensatore.

Per realizzare questo spot di aria si è dovuti ricorrere ad un opportuno sistema di "gestione dell'aria", costruito per collegare lo scarico del motore con il condensatore esterno. L'oggetto della tesi è l'analisi e lo studio per la verifica del funzionamento di tale sistema che prende il nome di air flow management che verrà semplicemente chiamato con l'acronimo di AFM.

L'obiettivo è un risparmio energetico, raggiungibile ottimizzando il sistema A/C e migliorando la sua efficienza, e dunque ritardando la formazione di ghiaccio in prossimità di esso.

Per la verifica del sistema, sono state compiute diverse prove in galleria climatica, utili per simulare il funzionamento del veicolo in strada. L'utilizzo della galleria climatica è inoltre necessario per simulare, in determinati periodi dell'anno, le condizioni critiche per la formazione del ghiaccio sul condensatore esterno (OHX) e per rendere ripetibili tali prove. I primi tests erano mirati a studiare il funzionamento della pompa di calore con la presenza del sistema AFM, mentre nelle ultime prove è stata compiuta una verifica sul funzionamento del sistema A/C nel caso in cui anziché la pompa di calore viene attivata l'aria condizionata. Lo scopo è quello di verificare come funziona il sistema A/C, nel caso in cui è presente il sistema di air flow management e capire quanto possa gravare in termini energetici.

Nei vari capitoli verrà descritto il sistema A/C del veicolo in esame, la struttura e i passaggi che hanno portato alla costruzione del sistema di air flow management ed infine i risultati ottenuti nelle diverse prove.

CAPITOLO 1

SISTEMA POMPA DI CALORE E APPLICAZIONE SUL VEICOLO ELETTRICO RENAUL ZOE

1.0 FUNZIONAMENTO DELLA POMPA DI CALORE

È noto che il calore si trasferisce da una sorgente a temperatura più calda ad una sorgente a temperatura più fredda. Tale processo in natura si verifica spontaneamente mentre il processo inverso richiede una spesa di energia attraverso opportune macchine, creando così un ciclo termodinamico inverso. In particolare attraverso queste macchine è possibile raffreddare un ambiente a temperatura bassa trasferendo il calore in un ambiente a temperatura più alta detto pozzo; esso è detto ciclo frigorifero e la macchina che permette di compiere questa operazione è detto frigorifero. Un'altra macchine in grado di trasferire il calore da una sorgente più fredda a una più calda è la pompa di calore. La differenza tra le due macchine è solo in termini di effetto utile, infatti mentre il frigorifero ha lo scopo di raffreddare, la pompa di calore ha lo scopo di riscaldare un ambiente sottraendo calore da una sorgente a temperatura inferiore.

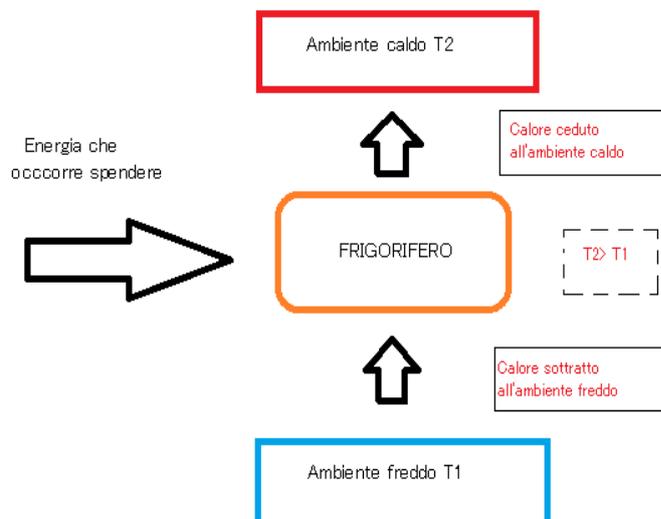


FIGURA 1: schema di funzionamento del frigorifero e della pompa di calore.

I componenti principali di una pompa di calore, rappresentati in figura 2, sono: l'evaporatore, anche detto condensatore esterno, è lo scambiatore di calore che si interfaccia con l'ambiente e assorbe calore dall'aria atmosferica; il condensatore, anche detto condensatore interno, è lo scambiatore di calore che rilascia calore nell'ambiente da riscaldare; il compressore che permette il moto del flusso all'interno del circuito e dà anche un contributo in termini energetici al refrigerante; la valvola di

laminazione che permette la laminazione del refrigerante e lo raffredda prima di arrivare nel condensatore esterno. Una macchina frigorifera è costituita dagli stessi componenti ma, dovendo stavolta raffreddare un ambiente, il funzionamento del condensatore e dell'evaporatore è invertito (vedi figura 3).

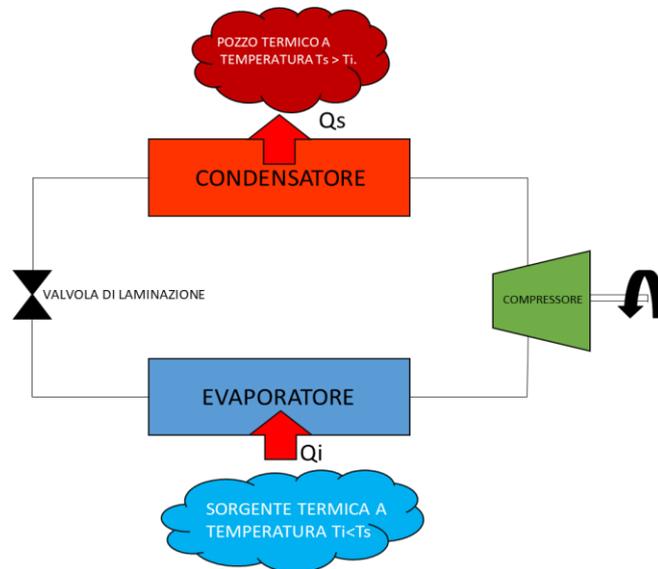


FIGURA 2: schema semplificato della struttura della pompa di calore.

Il parametro che definisce le prestazioni di una pompa di calore è detto fattore di moltiplicazione termica o COP. Esso è definito come:

$$COP = \frac{|Q_s|}{|Q_s| - Q_i} \quad (1)$$

ovvero:

$$COP = \frac{\text{energia termica resa al corpo da riscaldare}}{\text{energia elettrica consumata}} \quad (2)$$

Tale coefficiente è sempre superiore a uno: e, più è grande, più è alta l'efficienza della pompa di calore. Per capire meglio, ad esempio, se una pompa di calore presenta un COP pari a 3, ciò significa che per ogni kW di

energia spesa, la pompa di calore renderà 3kW d'energia termica all'ambiente da riscaldare.

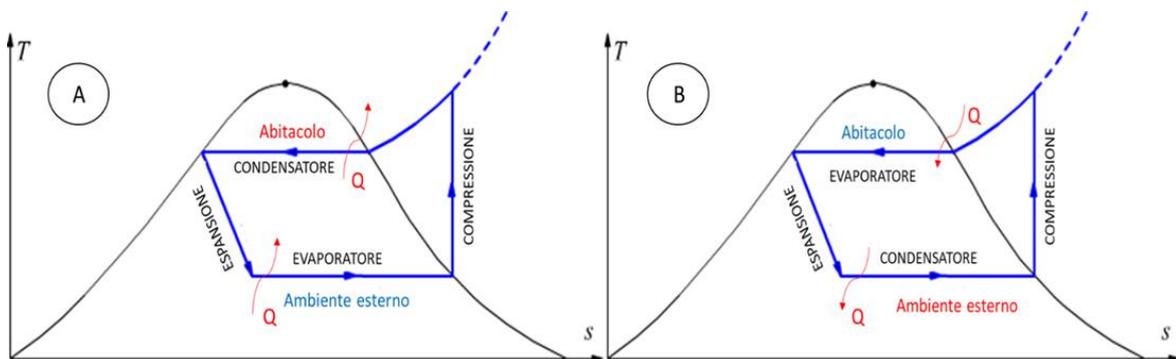


FIGURA 3: A. ciclo termodinamico della macchina frigorifera; B. ciclo termodinamico della pompa di calore.

1.1 CENNI SUL REFRIGERANTE R1234yf

Affinché l'impianto di climatizzazione funzioni correttamente occorre la presenza di qualcosa che permetta il trasferimento di energia e che consenta di fare interagire i componenti dell'impianto tra di loro. Questo avviene grazie alla presenza del refrigerante che permette di creare il ciclo termodinamico mostrato in figura 3, e la sua presenza è indispensabile sia per il funzionamento in pompa di calore sia per il funzionamento in aria condizionata. Il raffreddamento o il riscaldamento dell'aria che entra in abitacolo è reso possibile grazie alla sua interazione con il refrigerante che è in grado di compiere una successione di stati termodinamici a pressione, volume e temperatura diversi (vedi figura 3), cioè permette di trasferire calore da una sorgente fredda ad una sorgente calda, nel caso di pompa di calore, mentre da una sorgente calda a una fredda, nel caso di funzionamento in aria condizionata. Le caratteristiche che deve possedere un buon refrigerante sono:

- elevata capacità termica, dunque deve essere in grado di immagazzinare grandi quantità di calore;
- elevata densità allo stato gassoso e liquido;
- elevata energia per l'evaporazione in modo da riuscire ad assorbire maggiore calore dall'esterno;
- basse temperature di ebollizione alla pressione atmosferica in modo da assorbire calore in modo agevolato;

Il refrigerante in uso nei veicoli moderni è il R1234yf e ha sostituito il refrigerante R 134a, che nonostante le ottime caratteristiche, ha un impatto ambientale evidente in termini di effetto serra. Con il termine Global Warming Potential (GWP) si intende lo standard internazionale utilizzato per misurare quanto è pericoloso un gas per tale effetto. Il GWP è un parametro definito come il rapporto tra la forzante radiativa di una specie e la forzante radiativa della specie di riferimento (CO₂). È stato riscontrato che il refrigerante R134a possiede un valore di GWP pari a 1430. Tale valore è molto più alto del valore massimo raccomandato secondo la normativa (il valore massimo secondo la normativa è di 150 GWP); ciò vuol dire che una molecola di tale composto incide come 1430 volte una molecola di CO₂. Il valore GWP del R1234yf invece è di 4, con un impatto ambientale trascurabile rispetto al precedente, riuscendo inoltre a mantenere le stesse efficienze di funzionamento. La differenza tra i due refrigeranti non è legata solo al concetto di inquinamento ma anche a differenze di natura tecnica, legate al fatto che l'R1234yf è un poco più infiammabile e lavora a più elevate pressioni e temperature; inoltre per ottenere le stesse prestazioni di un impianto con R134a, l'utilizzo dell'R1234yf prevede un aumento del 5% della quantità di refrigerante necessaria. Infine è possibile elencare alcune importanti proprietà che rendono l'R1234yf un buon sostituto del R134a:

- elevato coefficiente di prestazione COP legata a una buona capacità termica;
- presenta migliori qualità fluidodinamiche, riducendo il lavoro meccanico del compressore e dunque il consumo di energia da parte di questo;
- rispetto al R134a, l'R1234yf offre una migliore miscibilità con i lubrificanti PAG attualmente utilizzati negli impianti clima.

1.2 SISTEMA A/C DELLA RENAUL ZOE

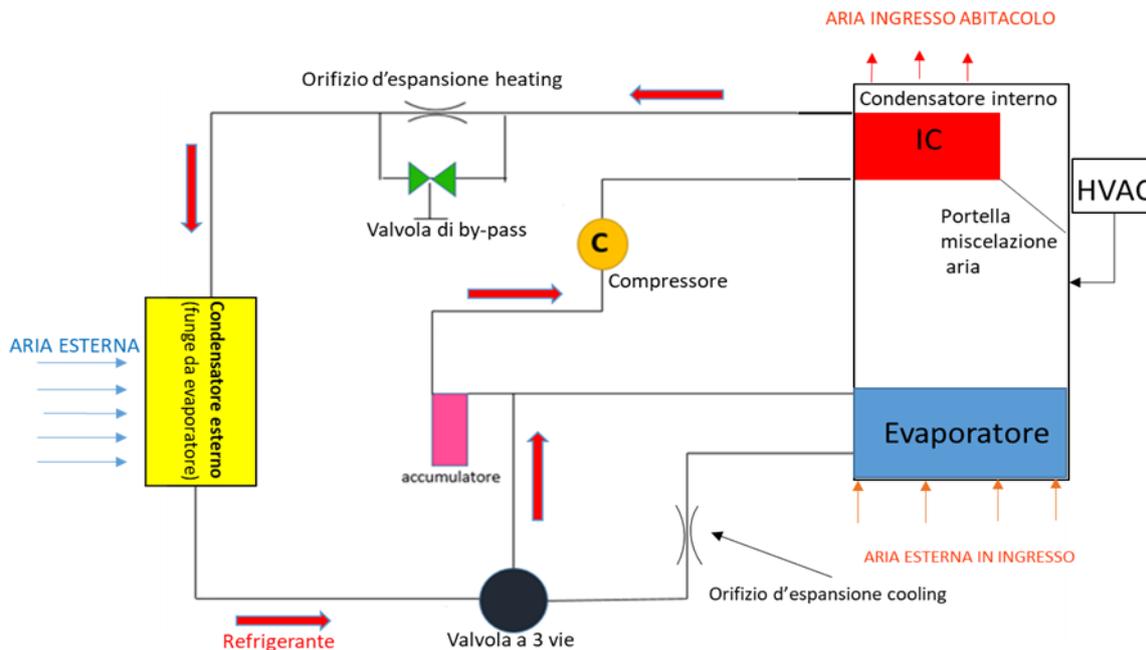


FIGURA 4: sistema A/C della Renault Zoe.

Un sistema A/C trova applicazione in diversi campi e in particolare anche per il riscaldamento o il raffreddamento dell'abitacolo di un veicolo. In particolare l'analisi si concentra sul sistema A/C di un veicolo full- electric, la Renault Zoe, schematizzato in figura 4. Muovendoci in senso antiorario troviamo:

- **VALVOLA A 3 VIE:** valvola che permette di separare il sistema nei due diversi tipi di funzionamento (climatizzatore, pompa di calore);
- **ACCUMULATORE:** sistema di accumulo del refrigerante;
- **COMPRESSORE:** componente che permette la circolazione del refrigerante nel circuito e fornisce anche un contributo energetico (vedi formula 3). Attraverso di esso il refrigerante passa da un'ambiente di bassa pressione ad uno di alta pressione.

$$Q_{IC} = Q_{CE} + L_{Compressore} \quad (3)$$

In riferimento alla formula (3), si ha:

- ✓ Q_{IC} : calore posseduto dal refrigerante che arriva nel condensatore interno;
- ✓ Q_{CE} : calore assorbito dal refrigerante nel condensatore esterno;
- ✓ $L_{Compressore}$: lavoro fornito dal compressore;

- **HVAC**: sistema che si interfaccia con l'abitacolo; l'aria dall'esterno passa attraverso tale sistema e viene riscaldata o raffreddata a seconda del diverso funzionamento. All'interno dell'HVAC sono presenti i seguenti componenti:
 - ✓ *Porticella miscelazione aria*: sportellino che serve per separare i componenti interni nei due diversi tipi di funzionamento. Quando il funzionamento è in pompa di calore, lo sportellino è come in figura 4 ed è disposto in modo da obbligare il flusso a passare dall' IC; quando funziona in aria condizionata, la portella si dispone in modo che l'aria passa solo nell'evaporatore.
 - ✓ *Evaporatore*: scambiatore di calore usato durante il funzionamento in aria condizionata; passando attraverso di esso l'aria viene raffreddata.
 - ✓ *IC*: anche chiamato condensatore interno (inner condenser), è lo scambiatore di calore interno usato durante il funzionamento in pompa di calore utile per riscaldare il flusso di aria prima di entrare all'interno dell'abitacolo.
 - ✓ *PTC*: sistema di riscaldamento ausiliario usato per garantire il giusto confort all'interno dell'abitacolo. Esso è costituito da una resistenza elettrica che, quando ci si trova in alcune condizioni particolari, per effetto joule permette di scaldare l'aria che lo attraversa.

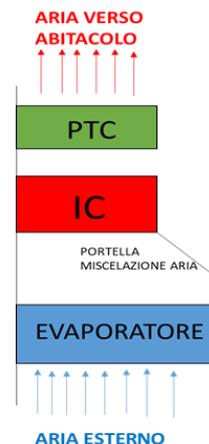
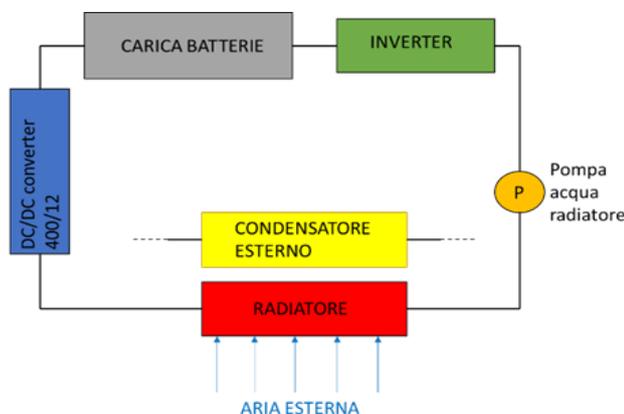


FIGURA 5: struttura del HVAC

- **ORIFIZIO D'ESPANSIONE HEATING**: usato per raffreddare il refrigerante (grazie al fenomeno d'espansione) prima di entrare nel condensatore esterno;
- **VALVOLA DI BY-PASS**: valvola utilizzata per il *de-frosting* (lo scopo verrà spiegato nel dettaglio nel paragrafo 1.3 "formazione di ghiaccio nel condensatore esterno").
- **CONDENSATORE ESTERNO (FUNZIONAMENTO DA EVAPORATORE IN POMPA DI CALORE)**: scambiatore di calore che si interfaccia con l'esterno. Tale componente è l'elemento in esame

perché nel sistema pompa di calore, la formazione di ghiaccio su di esso, determina alcuni problemi che verranno spiegati nei paragrafi successivi.

È infine interessante spendere qualche parola anche sul radiatore, scambiatore di calore posto sul fronte veicolo, utile per il raffreddamento di alcuni componenti dell'auto che durante il suo normale funzionamento si riscaldano e, dovendo lavorare a determinate temperature, necessitano di essere raffreddati. In figura 6 è mostrato uno schema semplificato del sistema al fine di spiegare il funzionamento: l'acqua dalla pompa passa nei vari componenti da raffreddare (convertitore DC/DC, carica batteria ed inverter)



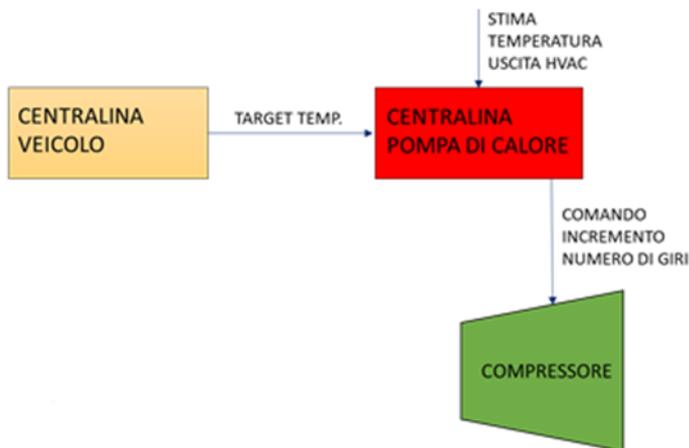
assorbendo calore che successivamente verrà rilasciato verso l'esterno.

FIGURA 6: schema semplificato del sistema che permette il raffreddamento di alcuni componenti del veicolo.

1.3 FORMAZIONE DI GHIACCIO NEL CONDENSATORE ESTERNO (EVAPORATORE)

Un problema comune alle pompe di calore con evaporatore ad aria è la formazione di ghiaccio sulla superficie del condensatore esterno a causa dell'umidità dell'aria e delle basse temperature raggiunte in prossimità di esso. La conseguenza è un notevole calo dell'efficienza del sistema che diventa sempre più marcato man mano che aumenta la superficie di ghiaccio ovvero man mano che si riduce la temperatura o aumenta l'umidità dell'aria a basse temperature. Tale calo di efficienza è dovuta proprio alla riduzione della superficie attiva, ovvero la superficie in cui aria e refrigerante interagiscono, e comporta una riduzione dello scambio termico. Se ci proiettiamo nel campo automobilistico, la riduzione dello scambio termico riduce la temperatura del refrigerante che arriva nel HVAC e si traduce nella riduzione della temperatura dell'aria che passa attraverso il condensatore interno e dunque del confort percepito all'interno dell'abitacolo. L'automobile possiede un'elettronica di controllo che permette di gestire il

fenomeno appena esposto, e può essere spiegato in riferimento alla figura 7. La centralina del veicolo, in base alle richieste dell'utente, imposta un target di temperatura e lo manda alla centralina della pompa di calore; quest'ultima va a stimare il valore di temperatura dell'aria all'uscita del condensatore interno e la confronta con il valore di target. In base al ΔT , la centralina della pompa di calore va ad agire sul compressore aumentando il numero di giri e dunque il suo consumo e ciò determina un incremento della temperatura del refrigerante (vedi formula (1)).



Questa operazione viene compiuta sia durante la fase di avviamento della pompa di calore, per far sì che la temperatura desiderata si raggiunga nel più breve tempo possibile, sia per ritardare l'effetto dovuto alla formazione di ghiaccio nel condensatore.

FIGURA 7: Sistema di controllo temperatura HVAC.

Dunque, con l'operazione appena esposta, non è possibile ritardare e/o evitare la formazione di ghiaccio e occorre quindi un'operazione che permette di eliminare lo strato che si è formato e ripristinare il funzionamento. Tale operazione è chiamata *de-frosting* o *de-icing* e consiste nella temporanea inversione del ciclo in modo da portarci in funzionamento ad aria condizionata, facendo circolare refrigerante, ad alta temperatura, nel condensatore esterno. È proprio durante questa fase che viene attivato il PCT in modo da garantire il confort all'interno dell'abitacolo. È importante impostare in modo adeguato la frequenza dei cicli di sbrinamento: compiere cicli di *de-frosting* con frequenza bassa porta alla formazione di grandi spessori di ghiaccio sull'evaporatore, peggiorando lo scambio termico, mentre sbrinamenti troppo frequenti comportano l'immissione di acqua fredda nell'impianto. Inoltre anche la durata dello sbrinamento risulta strategica per il completo scioglimento della brina, infatti se non tutta la quantità presente sull'evaporatore viene sciolta la parte rimanente tende, con la successiva ripartenza del compressore e produzione di caldo, a solidificarsi in maniera consistente. In questo modo, nella fase di

funzionamento successiva, al parziale sbrinamento la brina tende a diventare più compatta, rendendo più complesso il funzionamento. L'aumento dello strato di ghiaccio sull'evaporatore comporta, come già detto, una riduzione delle prestazioni della pompa di calore e un incremento dei consumi energetici dovuto all'incremento della potenza assorbita dal compressore e all'attivazione del PTC. Tale consumo energetico risulta essere molto gravante nei veicoli elettrici che devono in tutti i modi ridurre il consumo energetico per aumentare l'autonomia della batteria.

1.4 EFFETTI SULLA FORMAZIONE DI GHIACCIO

Per poter capire come lavora il sistema, si considera la figura 8 dove è presente l'andamento di tre grandezze caratteristiche: temperatura dell'aria in uscita dal condensatore interno (curva blu), velocità del compressore (curva azzurra) e temperatura refrigerante in uscita del condensatore esterno (curva rossa). Inoltre è possibile dividere il funzionamento del sistema in tre fasi:

- *Warm-up*: fase iniziale, ovvero la fase in cui l'utente attiva il sistema all'interno dell'abitacolo. È importante che tale fase avvenga più velocemente possibile in modo che la richiesta dell'utente, e quindi il confort richiesto, sia soddisfatto nel più breve tempo possibile.
- *Steady state*: fase di funzionamento a regime in cui si è raggiunto la temperatura di target.
- *Icing*: è la fase critica del funzionamento del sistema dove lo strato di ghiaccio formatosi è tale da ridurre notevolmente lo scambio termico e il sistema agisce in modo da ridurre gli effetti negativi di questo fenomeno.

Nella prima fase, *warm up*, la temperatura in prossimità del HVAC, aumenta fino a raggiungere un massimo (valore che corrisponde alla richiesta dell'utente). Per poter fare ciò nel più breve tempo possibile, il numero di giri del compressore aumenta e con esso il suo consumo in modo da migliorare l'effetto utile (in analogia alla formula 1). La temperatura del refrigerante in uscita dal condensatore ha un andamento inizialmente decrescente e poi si incrementa fino ad un determinato valore. Per quanto riguarda lo *steady state*, esso corrisponde alla fase di funzionamento normale del sistema che funziona con massima efficienza. Infine nella fase *icing*, come già detto, lo strato di ghiaccio formatosi è tale da ridurre notevolmente lo scambio termico tra aria e refrigerante. Si nota come la temperatura in uscita dal condensatore esterno, all'inizio di tale fase, inizia a ridursi e per

poter compensare tale effetto, la centralina del sistema A/C comanda l'incremento del numero di giri del compressore in modo da aumentare la temperatura del refrigerante (in analogia alla formula 1). Come si vede in figura 8, questo fa sì che il compressore raggiunge il massimo numero di giri e quindi il massimo consumo mentre la temperatura dell'aria si mantiene inizialmente costante, grazie all'effetto di questo, e successivamente decresce quando il compressore raggiunge il massimo numero di giri.

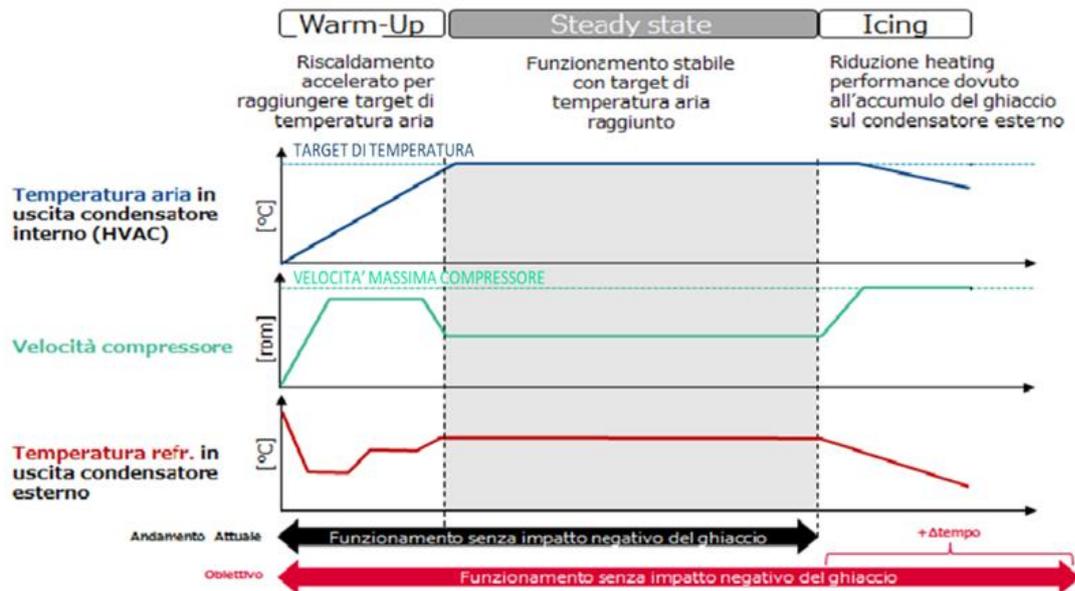


FIGURA 8: Andamento di tre grandezze caratteristiche nel funzionamento della pompa di calore.

È intuitivo capire che durante la fase *icing*, il consumo energetico del sistema aumenta. Inoltre il *defrosting*, utile per il ripristino del funzionamento del sistema, determina una riduzione dell'efficienza delle pompe di calore. L'ideale è quello di evitare la formazione di ghiaccio ed eliminare tale fase in modo che si fa funzionare il sistema sempre nelle condizioni ottimali e si evita consumi eccessivi di energia che, soprattutto nei veicoli elettrici, risulta essere un aspetto molto importante per l'autonomia delle batterie. Per il soddisfacimento degli obiettivi si è sfruttato la struttura della Renault Zoe che presenta una componentistica interessante, la quale verrà descritta nel paragrafo successivo.

1.5 RENAULT ZOE: PRESENTAZIONE DEL VEICOLO UTILIZZATO PER LO STUDIO DEL SISTEMA A/C

La Zoe è una vettura utilitaria realizzata dalla casa automobilistica Renault a partire dal 2013. La Zoe è il risultato di un progetto partito qualche anno prima, intorno al 2005, che prevedeva la produzione di veicoli “full-electric” con impatto ambientale nullo in termini di emissioni. Dopo anni di sviluppi e test sulla vettura con prove a bassa temperatura e crash test (per testare il funzionamento delle batterie), nel 2012 fu svelata al salone di Ginevra la versione attuale della Renault Zoe iniziando la commercializzazione alla fine dello stesso anno. Essendo come già detto un “full-electric”, la sua struttura interna oltre ad essere diversa è anche più semplice rispetto ad un veicolo con motore termico o ad un ibrido. I componenti fondamentali per il funzionamento sono: il motore sincrono elettrico, la batteria, il carica batteria, l’inverter e il convertitore DC/DC.

1.5.1 BATTERIE

Il veicolo in esame monta una batteria, posta sotto l’abitacolo, a ioni di litio e manganese di 41kWh con dodici moduli e 192 celle con un peso complessivo di 305 kg. Grazie a un sistema ideato da Renault e denominato Caméléon, si ha la possibilità di ricaricare in più modalità: con la presa elettrica di casa (3 kW) con una ricarica in 6-9 ore, mediante le colonnine di ricarica da 22 kW che richiedono un'ora per ricaricare le batterie all'80% oppure con le colonnine da 43 kW che invece richiedono mezz'ora sempre per una ricarica all'80%. In generale una batteria agli ioni è costituita da ioni di litio che si spostano dall'elettrodo negativo all'elettrodo positivo durante

la scarica e viceversa durante la carica. Le batterie dei veicoli elettrici diventano pericolose, in termini di sicurezza, in alcune condizioni operative poiché contengono un elettrolita infiammabile e possono creare problemi al guidatore.



FIGURA 9: Pacco batteria Renault Zoe.

Ad esempio, una batteria che carica troppo velocemente potrebbe causare un corto circuito, portando a esplosioni e incendi oppure lo stesso può verificarsi nel caso in cui la batteria subisce un urto durante un incidente.

In tal caso è presente un sistema di sicurezza che permette di scollegare le batterie nel momento in cui il veicolo si trova in determinate condizioni considerate pericolose. Con tale batteria, l'autonomia del veicolo è di 403 km su un ciclo NEDC e, nel caso in cui sono azionati gli organi ausiliari, diventa di circa 300 km con aria condizionata accesa e 200 km con riscaldamento acceso.

Infine un componente molto importante che permette di controllare e supportare la carica della batteria è il carica batterie. Esso svolge tre compiti fondamentali:

- converte la corrente alternata, fornita dalla rete elettrica, in corrente continua;
- controlla il livello di tensione delle celle della batteria regolando la velocità di carica;
- monitora la temperatura delle celle e controlla la carica per mantenere la batteria in salute.

1.5.2 INVERTER

L' inverter è un apparato elettronico che ha la funzione di trasformare una corrente continua (DC), in corrente alternata (AC) a una determinata tensione e frequenza. Ciò avviene perché i vari componenti, che costituiscono l'elettronica di consumo e richiedono energia dalle batterie, funzionano in corrente alternata mentre le batterie funzionano a corrente continua. Occorre dunque un dispositivo che riesce a convertire tale corrente e permette di fornire la giusta energia ai vari componenti. Tale dispositivo è costituito da un'unità di commutazione automatizzata che è in grado di capovolgere la corrente continua nel primario, cambiando il verso di percorrenza e invertendo i contatti, producendo così corrente alternata nel secondario. Se si attiva e disattiva semplicemente la corrente continua, o la si ribalta avanti e indietro in modo che la direzione continui a invertirsi ciò che ne esce fuori è un'onda quadra. Tale onda può non risultare idonea per alcuni dispositivi elettronici i quali preferiscono un'onda sinusoidale; da ciò nasce l'esigenza di creare un inverter di tipo sinusoidale puro e inverter di tipo sinusoidale modificato, anche detto quasi sinusoidali. I primi sono costituiti da trasformatori toroidali e circuiti elettronici per trasformare la corrente continua in una corrente alternata che varia in modo uniforme e molto simile al tipo di onda sinusoidale. Gli inverter sinusoidali modificati invece usano elettronica relativamente economica (tiristori, diodi e altri componenti semplici) per produrre un'onda quadrata "arrotondata" che

risulta adeguata per alcuni dispositivi mentre causa problemi ad altri dispositivi elettronici che preferiscono i sinusoidali puri.

Nel caso dell'inverter di un veicolo elettrico, esso ha il compito di convertire la corrente continua in corrente alternata utilizzata dal motore elettrico; ciò perché, come già detto, le batterie funzionano in corrente continua mentre il



motore asincrono, nel suo utilizzo necessita di corrente alternata. Inoltre esso permette di regolare la velocità del motore, andando ad agire sulla frequenza, e permette di variare la potenza e la coppia, andando a regolare l'ampiezza del segnale.

FIGURA 10: Inverter Renault Zoe.

Per capire meglio il compito dell'inverter si consideri il caso in cui il veicolo sta accelerando; si può riassumere ciò che accade con i seguenti passaggi:

1. Premendo l'acceleratore, la batteria inizia ad erogare energia e l'alimentazione viene convertita da CC a CA attraverso l'inverter.
2. Il pedale dell'acceleratore invia un segnale alla centralina del veicolo e quest'ultima manda il comando all'inverter al fine di regolare la velocità del veicolo modificando la frequenza dell'alimentazione; in tal modo il motore gira e consente di fare girare le ruote.
3. In fase di decelerazione invece, o premendo il freno o quando l'auto rallenta, il motore inizia a funzionare da alternatore e produce energia che viene rimandata alla batteria in corrente continua usando sempre l'inverter che permette tale conversione.

Come già visto, tutto ciò funziona in modo efficiente grazie alla presenza della centralina veicolo, considerata "il cervello" dell'auto, che va a comandare l'inverter riuscendo a soddisfare la richiesta del guidatore. Infine è importante ricordare la presenza del convertitore DC/DC che permette di far variare la tensione da 400 volt della batteria dell'auto a 12 volt della batteria di bassa tensione (vedi figura 11); quest'ultima è essenziale per alimentare gli organi ausiliari che necessitano di bassa tensione per il loro funzionamento.



FIGURA 11: batteria di bassa tensione utilizzata per alimentare gli organi ausiliari del veicolo che necessitano, per il loro funzionamento, di una tensione bassa.

1.5.3 MOTORE R90

Fino al 2015 il motore di cui era equipaggiata la Renault Zoe era il Q 90 con un'architettura chiamata Gen2 (vedi figura 12). Con essa, ancora disponibile, il motore viene raffreddato ad acqua, insieme agli altri componenti del veicolo, andando ad aggravare in termini di peso.



Tale motore ha una potenza di 65kW (88cv) ed eroga una coppia massima di 220 Nm, ad un regime che va da 290 a 2500rpm, mentre il regime di massima potenza va invece dai 3000rpm in su. Il consumo della vettura con un motore Q 90 è di 146 kWh con un'autonomia su un ciclo NEDC di 368 km.

FIGURA 12: Motore Q 90.

Un vantaggio che tale motore offre è la maggiore velocità di ricarica rispetto al suo successore in quanto la batteria può essere caricata in una stazione di ricarica dei veicoli elettrici a una potenza massima di 43 kW.



FIGURA 13: Motore R90.

Dal 2015 è stato messo in commercio la Renault Zoe con un motore R 90 (vedi figura 13). Con un'architettura Gen3, attraverso una ventola montata sulla parte superiore, tale motore è raffreddato ad aria, la quale fuoriesce dal basso del veicolo. Con una coppia massima di 225 Nm, a un regime di rotazione che va da 225-4000rpm, e una potenza massima di 68 kW (92 cv), con un regime di rotazione che va dai 3000 ai 4000rpm, il motore ha un consumo di 133 Wh/km e consente un'autonomia di 400 km su un ciclo NEDC.



FIGURA 14: Struttura interna del motore R90.

La ventola serve solo il motore elettrico e, in riferimento alla figura 14, il flusso di aria entra nel riduttore (4), passa nello statore e nel rotore (2)(3) e arriva nel controllo della potenza elettrica (1) dove viene convogliata all'esterno. Nel passaggio da 4 a 1, l'aria si riscalda e l'entità del riscaldamento dipende dal carico motore.

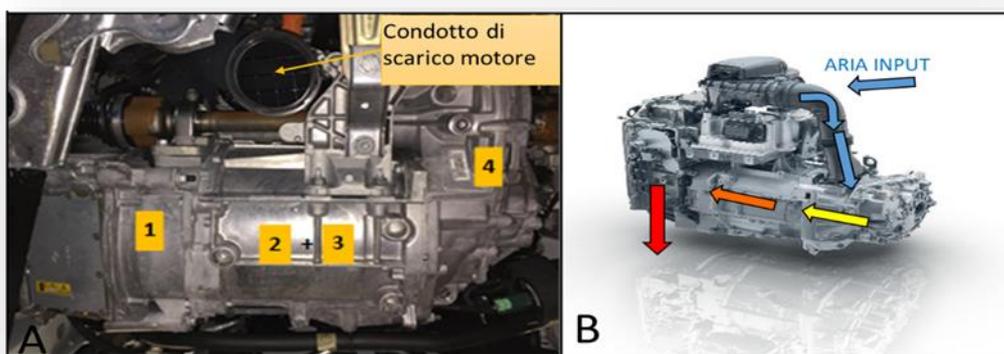


FIGURA 15: A. Vista dal basso del motore; B. Percorso dell'aria dall'ingresso all'uscita del motore.

Dunque all'uscita, l'aria calda viene scaricata verso l'esterno nella parte bassa del veicolo (vedi figura 15).

Tale flusso di aria può essere indirizzato in prossimità del condensatore per andare a ritardare la formazione di ghiaccio e dunque la fase icing durante il funzionamento in pompa di calore. È proprio su questo flusso che si concentra l'analisi in quanto se si riuscisse a indirizzare l'aria calda uscente dal motore in prossimità del condensatore esterno, si potrebbe ritardare la formazione dello strato di ghiaccio, riuscendo a migliorare l'efficienza del sistema A/C.



FIGURA 16: vista frontale del veicolo. È possibile notare la presenza del condotto di scarico dell'aria dal motore.

1.5.4 VENTOLA DEL MOTORE ELETTRICO

Per comprendere la dinamica dell'aria è utile conoscere il funzionamento della ventola di raffreddamento motore. In particolare è importante conoscere il suo funzionamento in base alle condizioni operative di quest'ultimo (portata di aria mandata, velocità di rotazione, il consumo, ecc..).

La ventola è azionata da un motore Brushless DC ed è regolata tramite un controllo P.W.M. che permette di far funzionare la ventola a diversi regimi di rotazione a una fissata tensione (la ventola è alimentata dalla batteria di bassa tensione a 13,5 volt). Come si vede in figura 18, vi sono due attacchi: uno è quello dedicato al P.W.M. (come è possibile vedere ci sono tre fili, due dedicati all'alimentazione e uno dedicato al controllo che è generalmente chiamato Trigger) mentre l'altro è l'attacco per l'alimentazione della ventola.



FIGURA 17: Vista dal basso ventola motore.

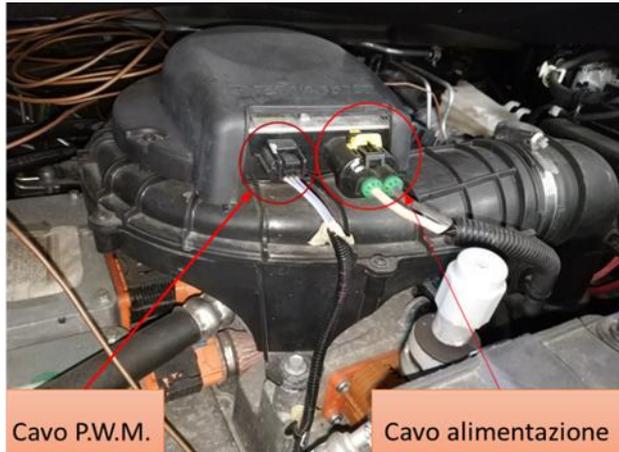


FIGURA 18: Vista frontale della ventola motore.

1.5.5 CONTROLLO PWM DELLA VENTOLA

Il PWM o modulazione dell'ampiezza dell'impulso (in inglese *Pulse Width Modulation*), consiste nel variare la potenza elettrica in corrente continua agendo sulla durata dell'alimentazione del carico con metodi on/off anche detti a commutazione. Normalmente i carichi elettrici sono allacciati a reti con tensione non modificabile e lavorano dunque a tensione imposta. Così ad esempio le lampadine, i motori elettrici o i forni, quando vengono azionati e non possiedono un controllo P.W.M., funzionano a potenza massima ovvero a regime e non possono lavorare a valori di potenza intermedi. È dunque qui che entra in gioco la tecnica P.W.M. che consiste essenzialmente nel trasmettere l'informazione attraverso un segnale impulsivo mediante la larghezza dell'impulso stesso. Alla base del controllo della potenza con PWM c'è un interruttore rapido, anche chiamato *chopper*, che è il commutatore che accende e spegne in continuazione il carico realizzando questa funzione. Per capire il funzionamento prendiamo in esame una lampadina. In essa è possibile far variare la luminosità andando ad agire sulla corrente mantenendo costante la tensione; in tal modo riesco a variare il consumo di potenza e regolare la sua luminosità mantenendo costante la tensione. Tutto questo è possibile perché quando si attiva l'interruttore di un dispositivo elettronico vi sarà sempre un transitorio per il raggiungimento della condizione di massima, qualunque sia il dispositivo in esame, e, sfruttando tale fenomeno, si riesce a compiere una sorta di regolazione. Se infatti si chiude l'interruttore per una durata inferiore al tempo necessario per esaurire il transitorio di accensione, viene fornita dell'energia ma non a sufficienza per far sì che l'apparecchio raggiunge i valori di regime. Se invece si apre l'interruttore, per una durata inferiore al tempo necessario per esaurire il transitorio di spegnimento, l'apparecchio non farà in tempo a

restituire l'energia già accumulata e non arriverà a fermarsi del tutto. Insomma l'apparecchio non è mai né completamente acceso né completamente spento. Per capire il principio di funzionamento del P.W.M consideriamo un generico segnale come in figura 19.

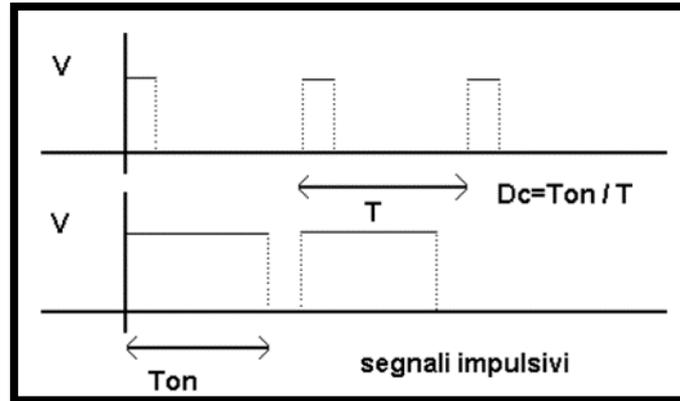


FIGURA 19: Generici segnali.

Indicando con:

- T_{on} il periodo in cui è chiuso l'interruttore;
- T_{off} il periodo in cui è aperto l'interruttore;
- T la somma di T_{on} e T_{off} ,

posso a questo punto definire il *Duty Cycle* come il rapporto tra T_{on} e T ovvero il rapporto tra il tempo in cui il l'interruttore è chiuso e il tempo totale.

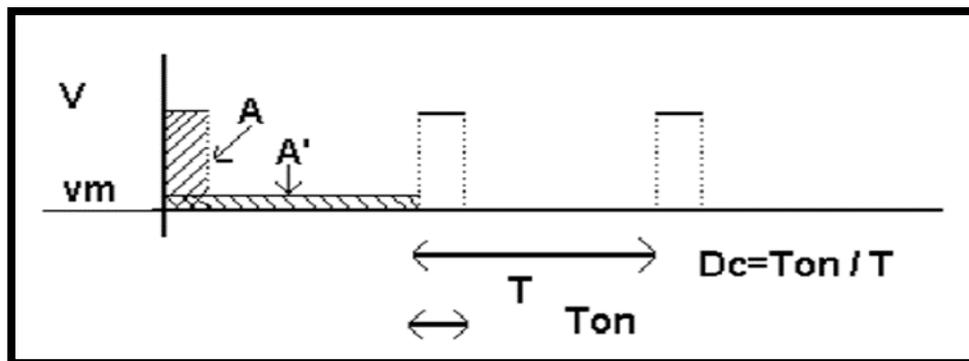


FIGURA 20: Andamento del segnale: si dimostra che A' è uguale ad A .

In relazione alla figura 20, possiamo a questo punto dire che il valor medio A' corrisponde a quel valore di potenza assorbita dal dispositivo elettrico che funziona con un controllo PWM e l'aria A' è uguale all'aria A . Si dimostra facilmente che:

$$A = V \cdot T_{on} \quad (4)$$

$$A^I = V_m \cdot T \quad (5)$$

$$A^I = A \Rightarrow V \cdot T_{on} = V_m \cdot T \quad (6)$$

$$V_m = V \cdot \frac{T_{on}}{T} = V \cdot \delta \quad (7)$$

Quindi il valore medio è proporzionale al *Duty Cycle*, dove V è il valore di tensione a monte del *chopper*. Essendo il *Duty Cycle* un valore compreso tra 0 e 1, il valor medio varia da 0 a V .

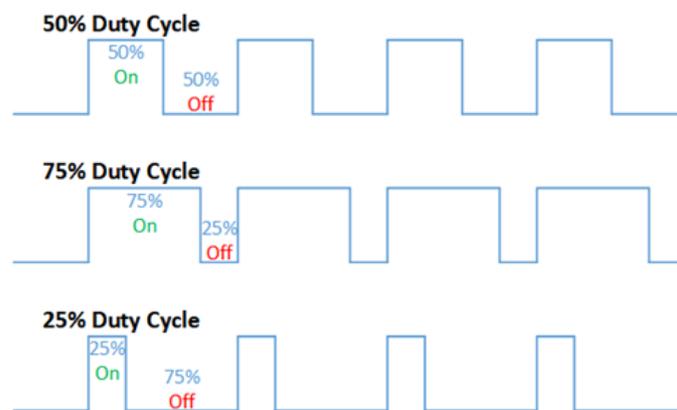


FIGURA 21: La regolazione di un dispositivo avviene con l'alternarsi dell'alimentazione tramite controllo on ed off.

Il vincolo per la caratterizzazione della regolazione della ventola sta nella difficoltà di reperire le informazioni su controllo del P.W.M. in quanto sono informazioni che possiede il costruttore e che difficilmente vengono fornite. È stata dunque compiuta una misura del consumo, della portata mandata e dell'assorbimento di corrente da parte del dispositivo in alcune condizioni operative, per poter capire come lavora e con quali ordini di grandezza.

1.6 PROVE SPERIMENTALI PER LA CARATTERIZZAZIONE DELLA VENTOLA

Le misure sulla ventola sono state compiute con lo scopo di determinare il suo funzionamento e determinare la portata in funzione della caduta di pressione e l'assorbimento di corrente per la caratterizzazione del consumo.

1.6.1 DESCRIZIONE DELL'AMBIENTE DI LAVORO

La ventola motore è stata montata all'interno di un ambiente chiuso chiamato *Plenum* ed è stata messa in comunicazione con l'esterno attraverso il condotto di mandata della stessa. Tale ventola aspira aria contenuta nel *Plenum* la quale arriva dall'esterno tramite un condotto che è costruito in modo da regolare la portata di aria che proviene dall'ambiente. Tale sistema consente di creare la caduta di pressione all'aspirazione della ventola motore, e non alla mandata come effettivamente accade nel suo normale funzionamento. Come si vede in figura 22, l'aria, dall'esterno, passa nel condotto collegato al *Plenum* e il flusso è regolato con l'ausilio di una ventola, posta in prossimità dell'ambiente esterno, e di una valvola, posta vicino al *Plenum*.

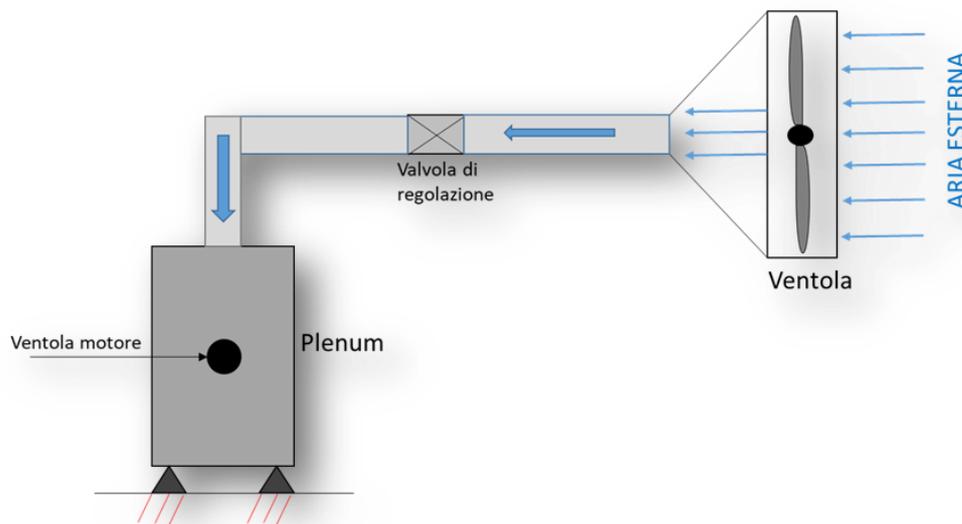


FIGURA 22: schema semplificato della struttura utilizzata per le prove sulla ventola.

Per capire meglio il funzionamento, partiamo dalla condizione per cui tra aspirazione e mandata c'è la massima caduta di pressione; in tal caso la ventola lavora con portata minima o nulla. Man mano che andiamo ad aprire

la valvola, la caduta di pressione all'aspirazione della ventola motore si



riduce (perché aumenta la portata di aria che arriva all'interno del Plenum) e aumenta la portata mandata da questa. Una volta che la valvola è completamente aperta, per ridurre ulteriormente la caduta di pressione, viene azionata la ventola posta in prossimità dell'ambiente esterno in modo da mandare maggiore portata all'interno del *Plenum* (vedi figura 22). Infine si arriva alla condizione per cui la caduta di pressione è minima e la ventola motore lavora alla massima portata e minimo consumo.

FIGURA 23: Plenum, contenitore usato per creare la caduta di pressione all'aspirazione della ventola.

1.6.2 RISULTATI DELLE PROVE

Le prove sperimentali non hanno permesso la determinazione della logica P.W.M. della ventola ma è stato possibile studiare la condizione di massima e la portata mandata per diversi valori di corrente e di tensione di alimentazione. Lo sperimentatore, andando a variare opportunamente l'apertura della valvola e la velocità della ventola posta in prossimità dell'ambiente esterno, ha determinato tre caratteristiche a tensione diverse. Questo ha permesso di capire ad esempio a quale valore di tensione si attiva la ventola (9 Volt) e la portata che manderebbe nel caso in cui venisse alimentata a 12 e 12,4 variando la corrente. Le tre caratteristiche appena citate sono mostrate in figura 24 dove ciascun colore indica una tensione diversa e a ciascuna curva corrisponde un'altra che indica il consumo di corrente in base alle condizioni operative. Quindi se ad esempio stessimo alimentando a 12 Volt, noto il consumo di corrente si riesce a determinare anche la portata e la caduta di pressione. Come già detto, queste prove non hanno consentito la caratterizzazione della ventola ma hanno dato un'idea su come essa funzioni e l'ordine di grandezza della portata con cui ci si troverà a lavorare.

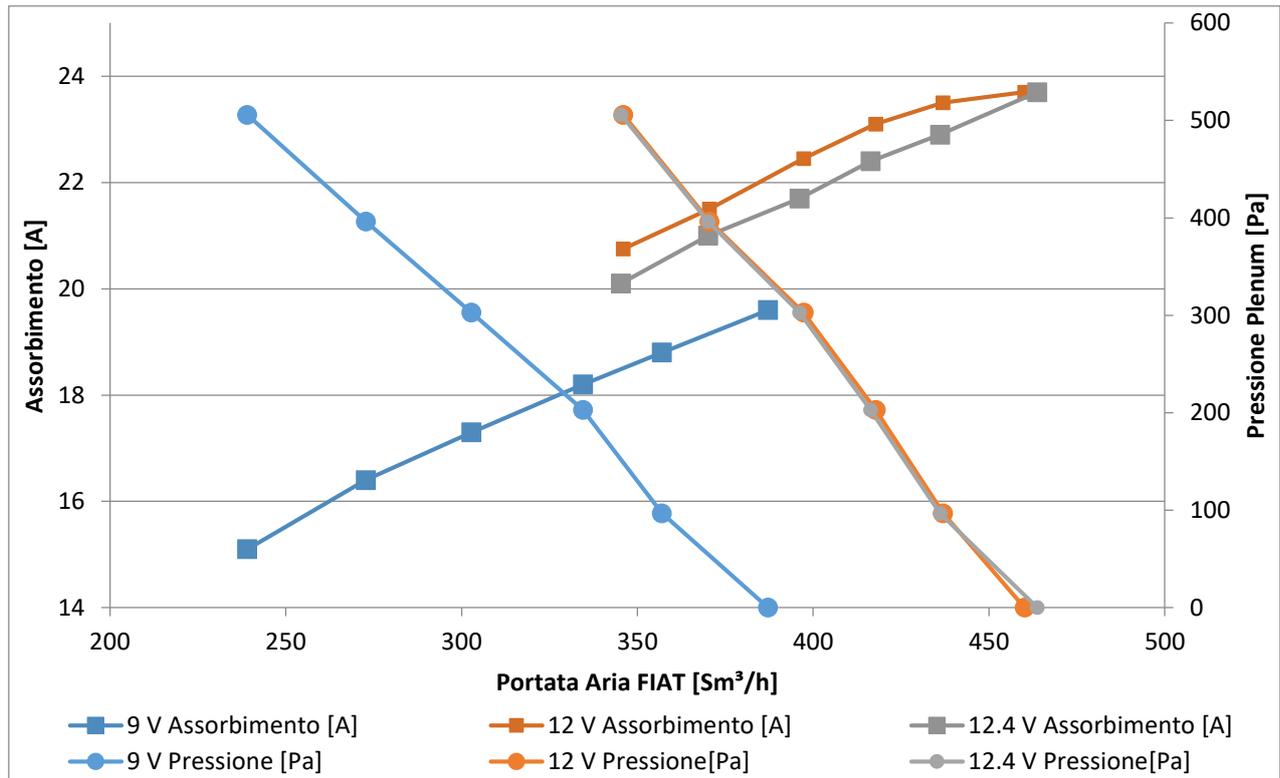


FIGURA 24: Caratteristiche della ventola a diversi valori di tensione di alimentazione. In genere, conoscendo il valore di tensione di alimentazione e l'assorbimento di corrente, si riesce a risalire alla pressione e alla portata di aria.

1.6.3 OSSERVAZIONI FINALI

La conoscenza della logica PWM della ventola sarebbe stata utile per capire il suo normale funzionamento e quando essa si attiva in base alle diverse condizioni operative del motore. La conoscenza di essa infatti avrebbe permesso di capire con quale frequenza essa si attiva e in quali condizioni operative. In tal modo sarebbe stato possibile capire se con il controllo del veicolo, essa avrebbe mandato aria a sufficienza da garantire il giusto funzionamento del sistema AFM. Purtroppo però, come già detto, non è stato possibile reperire informazioni in merito in quanto esse sono conosciute dal costruttore che difficilmente fornisce. Al di fuori del PWM, dai risultati ottenuti, si intuisce un comportamento non differente da una qualsiasi altra ventola e dunque si riesce ad apprezzare la semplicità del sistema e l'idea ingegneristica di alleggerire il motore utilizzando un sistema di questo tipo. Infatti conoscendo il campo di funzionamento utile per raffreddare il motore è possibile creare un sistema simile andando a mettere altra ventola in grado di garantire lo stesso effetto.

CAPITOLO 2

PREPARAZIONE DELLE PROVE

2.0 SCOPO DELLE PROVE

La chiave dell'analisi è il flusso di aria spinto dalla ventola che, uscendo dal motore, viene convogliata di fronte al condensatore al fine di ottenere benefici in termini di performance e consumi elettrici. In tal modo si parla di *air flow management* (gestione del flusso di aria) in quanto lo scopo delle prove è infatti quello di capire se con tale flusso di aria, convogliato di fronte al condensatore, si riesce a migliorare l'efficienza della pompa di calore, come già spiegato nel capitolo 1. L'elemento critico del sistema è il condensatore esterno che permette di interfacciare il refrigerante con l'ambiente esterno, assorbendo calore dall'aria e mandandolo nell'abitacolo.

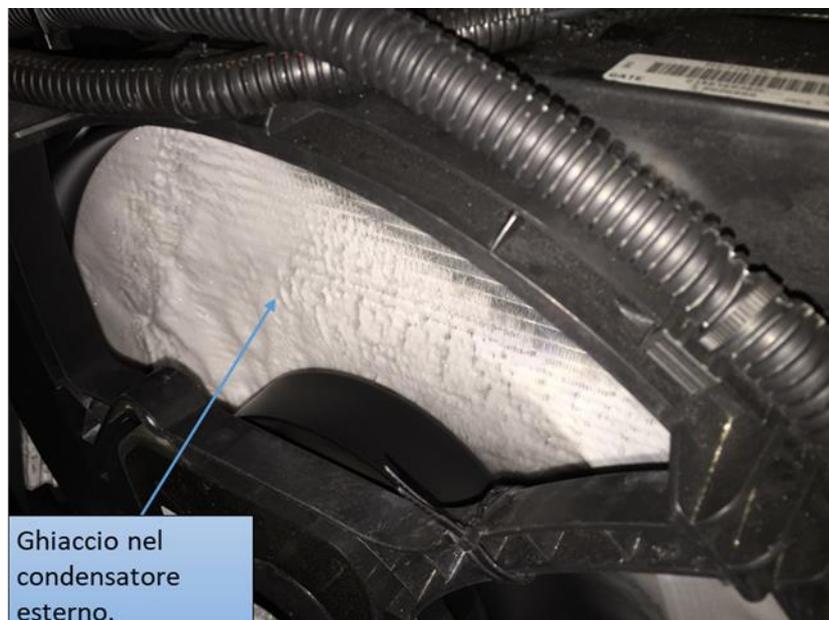


FIGURA 25: Formazione di ghiaccio sulla superficie del condensatore esterno.

Rispetto a un veicolo tradizionale in cui il motore genera molto calore, un veicolo “full electric” è molto più freddo e questo fa sì che la formazione di ghiaccio diventa critica. Quando l'aria passa attraverso il condensatore, avendo questa una percentuale di umidità relativa e a causa delle basse temperature in prossimità di esso, si ha la formazione di ghiaccio che va a coprire, dopo un certo arco di tempo, tutto il condensatore riducendo la superficie attiva (vedi figura 25). Quando ciò accade, l'efficienza del sistema si riduce e ha inizio la fase *icing*, spiegata all'inizio del capitolo precedente.

È possibile diagrammare l'andamento della temperatura misurata all'uscita del condensatore interno in funzione del tempo come in figura 26. Inizialmente la temperatura aumenta, raggiunge un massimo e poi si

stabilizza per un certo arco di tempo Δt fino a quando, come già detto, nel condensatore si forma, lungo la superficie, del ghiaccio che determina una riduzione della temperatura del refrigerante dovuto alla riduzione dello scambio termico.

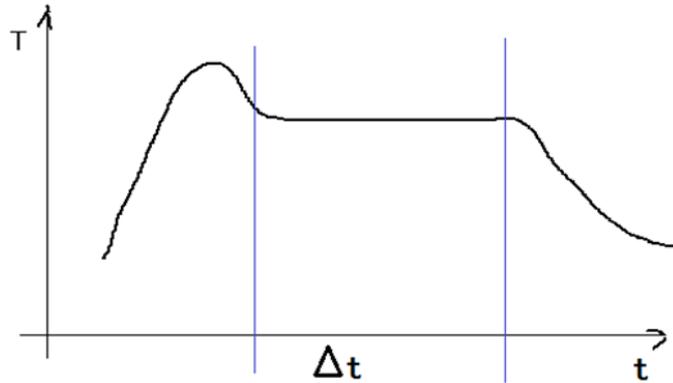


FIGURA 26: Andamento temperatura in abitacolo.

Nasce dunque la necessità di incrementare l'efficienza di scambio termico nel condensatore esterno e dunque ritardare la formazione del ghiaccio su di esso. Per fare ciò si utilizza un sistema AFM opportunamente costruito per convogliare il flusso di aria calda dal motore al condensatore. Per la verifica del funzionamento occorre compiere prove in galleria climatica che permettono di simulare l'andamento del veicolo in strada con la pompa di calore attivata in particolari condizioni ambientali (condizioni ambientali tali da portarci nelle condizioni critiche a determinati valori di temperatura e umidità dell'aria).

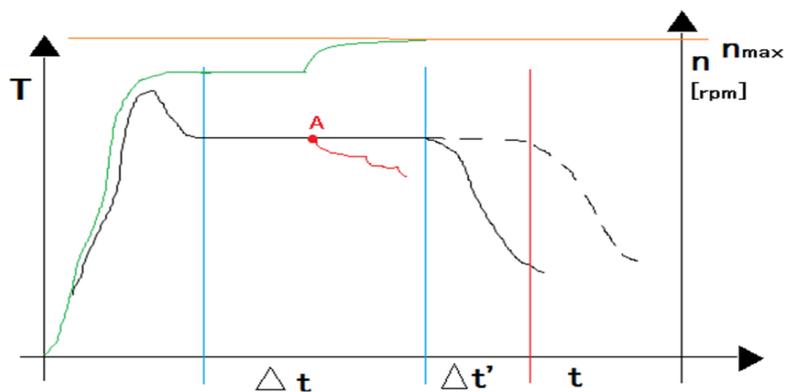


FIGURA 27: andamento della temperatura in abitacolo.

Entrando maggiormente nel dettaglio si analizzi la figura 27: in nero è mostrato l'andamento della temperatura in uscita dal condensatore interno che, come già detto, cresce e successivamente si stabilizza a un determinato valore mentre la curva verde mostra l'andamento del numero di giri del compressore che cresce e poi si stabilizza a in determinato regime. Si osserva come, quando si supera il punto A (punto oltre al quale la formazione di ghiaccio diventa critica), la velocità si incrementa fino al massimo numero di giri, che nel caso della Zoe corrisponde a 7000rpm, e da quel punto in poi la temperatura misurata all'interno dell'abitacolo inizia a decrescere fino a stabilizzarsi ad un valore più basso. La figura 27 fa capire, come spiegato già nel capitolo 1, che il problema non si concentra solo sulla temperatura ma anche sul consumo di energia e dunque durata della batteria. Infatti dal punto A in poi la formazione di ghiaccio inizia ad avere un certo peso e il sistema di controllo agisce sul compressore in modo da andare a compensare l'abbassamento della temperatura permettendo di mantenere l'andamento costante. Questo comporta una riduzione dell'efficienza del sistema e quindi del COP.

Nei paragrafi successivi verrà spiegato la procedura che ha permesso la costruzione del sistema di air flow management utile per convogliare il flusso nel condensatore esterno.

2.1 MODIFICA SUL VEICOLO

2.1.1 FASE PRELIMINARE

Il primo passo è caratterizzato nello studio del sistema per capire come convogliare il flusso dal motore al condensatore esterno. Tale studio si è dimostrato molto complicato a causa della mancanza di spazio e ha portato a scelte, dal punto di vista ingegneristico, non ottimali.

La scelta di come indirizzare il flusso dallo scarico del motore, il tipo di tubo da utilizzare e come convogliarlo nel condensatore ha richiesto un tempo abbastanza lungo accompagnato da un'attenta analisi. Inizialmente si è pensato di convogliare il flusso nel condensatore esterno dall'alto ma, a causa della mancanza di spazio, tale scelta è stata abbandonata.

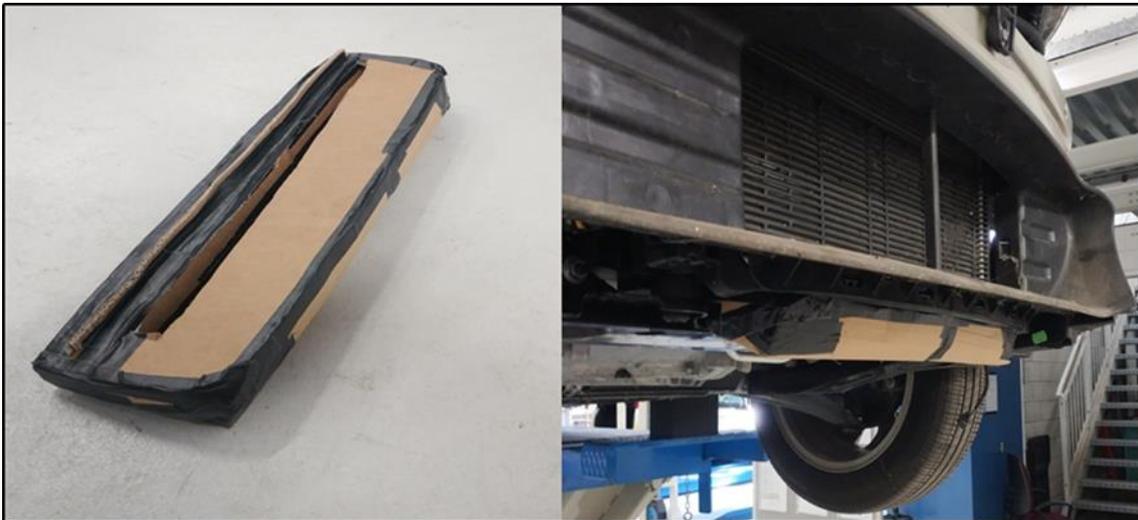
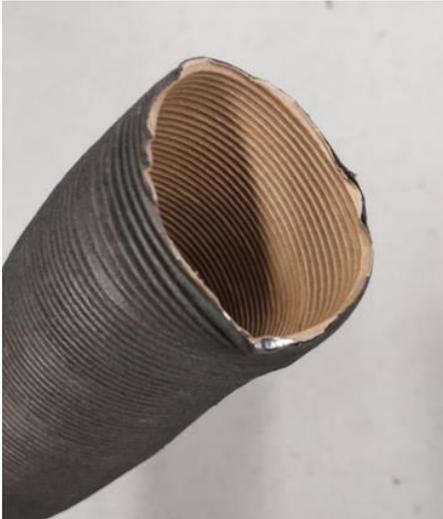


FIGURA 28: Modello del convogliatore usato per raccogliere il flusso in prossimità del condensatore.

Altro problema da tenere in considerazione è la forma del convogliatore dell'aria in prossimità del condensatore (componente che raccoglie il flusso di aria che arriva dal motore, e che la indirizza nel condensatore esterno). Idealmente si può pensare di costruire un piccolo “serbatoio” con una forma tale da riuscire ad indirizzare in modo ottimale tale flusso. Ciò può essere fatto usando la stampa 3D e in figura 28 è presente un modellino che rende l'idea della forma e della posizione in cui deve essere montato. Richiedendo tale metodo un tempo e un costo maggiore, si è proceduto costruendo tale componente utilizzando un foglio di materiale polimerico la cui struttura verrà spiegata nei paragrafi successivi. Infine per il trasporto dell'aria dal motore al condensatore è stato usato un tubo con caratteristiche tali da soddisfare determinate condizioni.

In questo modo si riesce a garantire:

- resistenza alle vibrazioni ed alle oscillazioni;
- flessibilità, riuscendo a mantenere la stessa sezione anche nei raccordi;
- ridotte perdite termiche, grazie alla presenza del doppio strato di cartone che è un ottimo isolante termico.



Tale tubo ha infatti una struttura particolare, costituita da tre strati: quello intero ed esterno in cartone mentre lo strato al centro è in alluminio (vedi figura 29).

FIGURA 29: tubo utilizzato per indirizzare l'aria difronte al condensatore.

2.1.2 FASE DI MONTAGGIO

Una volta individuate le scelte da compiere si è passati alla fase di montaggio; la scelta più difficile è stata quella di posizionare il tubo che collega il motore al condensatore.



Tale problema è sorto a causa delle dimensioni del tubo di scarico del motore che ha una dimensione di 85mm e risulta essere troppo grande rispetto alle dimensioni effettivamente disponibili (vedi figura 30).

FIGURA 30: sezione di uscita del motore.

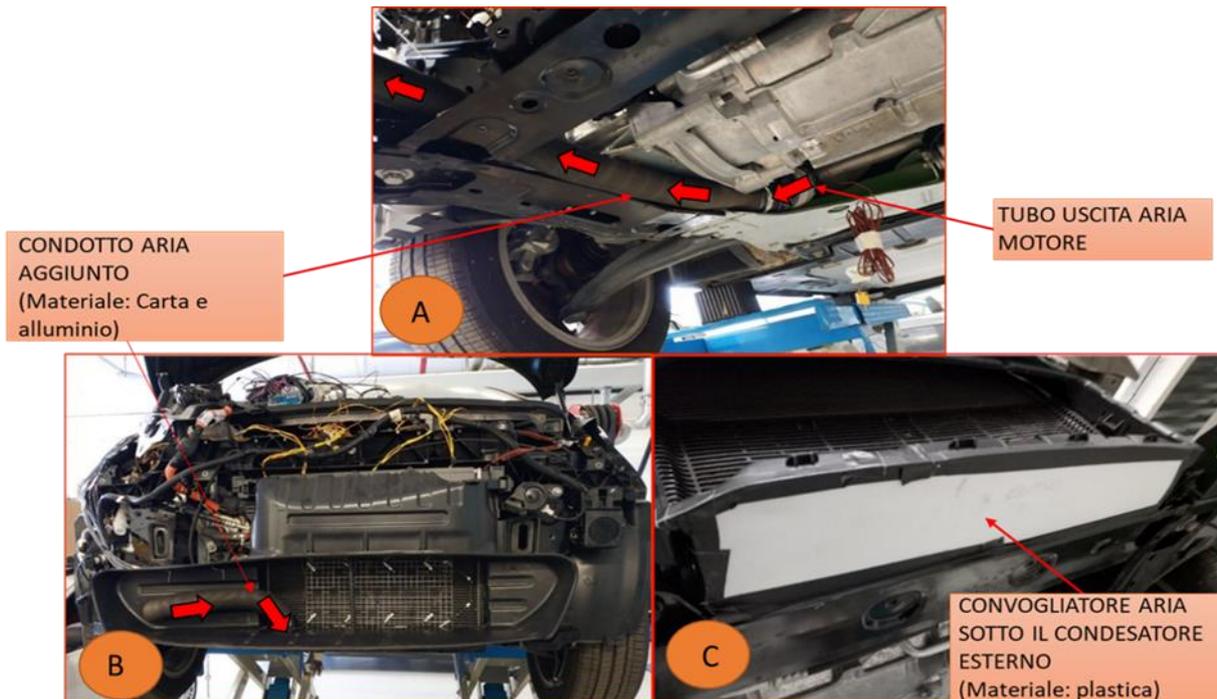


FIGURA 31: struttura opportunamente costruita per indirizzare il flusso nel condensatore.

Risulta necessario dunque, a causa del ridotto spazio, ridurre il diametro del tubo fino a 50mm accettando la conseguenza dell'incremento delle perdite di carico. Dai problemi di spazio appena esposti, il sistema di air flow management è stato strutturato come in figura 31. Il tubo dal motore è stato indirizzato di fronte al veicolo (vedi figura 31.B.), e, per fare arrivare tale tubo verso il convogliatore, il componente in plastica (componente posto di fronte al radiatore rappresentato in figura 31.B.) è stato forato utilizzando una fresa. Infine il convogliatore è stato costruito a partire da quello di cui si disponeva. Usando un opportuno foglio in plastica, sono stati ritagliati vari pezzi che corrispondono alle pareti, il tutto unito e isolato attraverso un particolare scotch che sigilla il sistema ed evita fughe di aria. Le fasi del montaggio e il risultato finale sono riassunte in figura 32. Infine la figura 33 mostra con maggiore chiarezza la struttura definitiva: la figura A rappresenta la zona all'uscita dal motore sotto il veicolo (si noti la presenza del raccordo di collegamento tra condotto e il tubo di uscita dal motore dove si ha il passaggio da 85mm a 55mm); la figura B invece rappresenta la zona frontale al veicolo dove il condotto incontra il convogliatore dall'esterno. Per ridurre le perdite di natura termica, nella parte del condotto che si affaccia direttamente all'ambiente, è stato messo un film di Armaflex, materiale isolante, che riduce le perdite termiche del flusso di aria calda proveniente dal motore (vedi figura 33.B).



FIGURA 32: sequenza di immagini che illustrano i passaggi per la costruzione del convogliatore sotto il veicolo, in prossimità del condensatore: 1. Vista dal basso del veicolo in cui è presente il cooling module; 2. Costruzione delle pareti del convogliatore nel lato sinistro; 3. Costruzione delle pareti nel lato destro; 4. Struttura complessiva.



FIGURA 33: Struttura finale del sistema usato per convogliare il flusso.

2.1.3 OSSERVAZIONI FINALI

Dalla descrizione del sistema nel paragrafo precedente si potrebbe pensare che le scelte e le modalità con cui è stato costruito risultano essere troppo superficiali. In realtà però, essendo in fase prototipale, l'ottimizzazione del sistema non è fondamentale per l'analisi in quanto, dovendo principalmente verificare, durante tale fase, il funzionamento del sistema, l'ottimizzazione sarà un aspetto da tenere in considerazione nelle fasi successive. Se infatti il sistema fornisce risultati interessanti, le fasi successive saranno caratterizzate nella sua ottimizzazione, migliorando la qualità dei materiali e

modificando la forma e dimensioni dei condotti (si potrebbero usare ad esempio: stampa 3d, modellizzazione componenti, studi CFD, studio dei materiali ecc...)

2.2 PREPARAZIONE PER L'ANALISI

Una volta ottimizzato e montato il sistema AFM si è proceduto allo svolgimento delle prove per verificare il funzionamento. L'analisi richiede l'acquisizione dei parametri di funzionamento del sistema che avviene attraverso opportuni sensori.

2.2.1 SENSORI E TRASDUTTORI

I sensori e i trasduttori sono dispositivi che servono per acquisire informazioni dell'ambiente. Essi sono usati in moltissimi campi e sono indispensabili per far funzionare un sistema automatizzato. Nel caso in esame tali strumenti hanno permesso di ricavare un valore numerico delle grandezze in esame per poter poi compiere le analisi e le verifiche. Inoltre la sostanziale differenza tra sensore e trasduttore è la seguente:

- *trasduttore*: dispositivo nel suo complesso che trasforma la grandezza fisica da misurare in un segnale di natura elettrica.
- *sensore*: elemento sensibile che trasforma la grandezza fisica in ingresso in una grandezza fisica in uscita facilmente acquisibile per via elettrica.

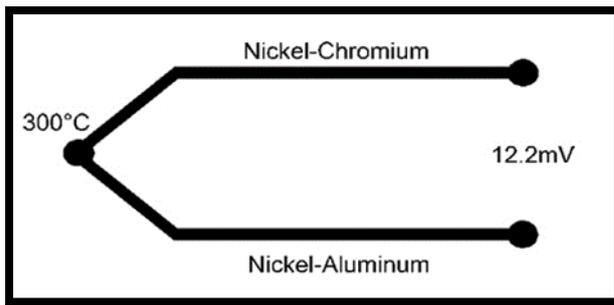
In molti casi la distinzione tra sensore e trasduttore non è così netta e delineata e molto spesso, nella letteratura tecnica e nella pratica comune, i due termini sono utilizzati come sinonimi.

2.2.3 SENSORE DI TEMPERATURA (Termocoppia)

Le termocoppie sono sensori di temperatura molto diffusi in diversi campi e possiedono le seguenti caratteristiche:

- semplici ed economiche;
- facilmente intercambiabili in quanto hanno connettori standard;
- capacità di misurare larghi range di temperatura;
- il più grande limite è la precisione (è difficile avere errori di lettura inferiori a 1°C).

Il principio di funzionamento delle termocoppie si basano sull'effetto Seebeck. Tale effetto prende il nome dal fisico Thomas Seebeck il quale casualmente scoprì che la giunzione tra due metalli diversi genera una tensione che è funzione della temperatura.



Dunque, come si nota in figura 34, una termocoppia è costituita da due conduttori di materiale diversi che si uniscono in un punto detto giunto caldo in prossimità della quale va effettuata la misura di temperatura.

FIGURA 34: struttura semplificata di una termocoppia.

Gli altri due estremi sono collegati ad una morsettiera alla quale è connesso lo strumento di misura. Questa morsettiera rappresenta il "giunto freddo", della quale è importante conoscere la temperatura al fine di attuarne la compensazione rispetto al giunto caldo. Esistono diversi tipi di termocoppie che si differenziano per range di funzionamento e per il tipo di applicazione, come mostrato in tabella 1.

Tipo Termocoppie	Range di Temperatura		
	Totale	con risoluzione 0.1°C	con risoluzione 0.025°C
B	da 20 a 1820	da 150 a 1820	da 600 a 1820
E	da -270 a 910	da -270 a 910	da -260 a 910
J	da -210 a 1200	da -210 a 1200	da -210 a 1200
K	da -270 a 1370	da -270 a 1370	da -250 a 1370
N	da -270 a 1300	da -260 a 1300	da -230 a 1300
R	da -50 a 1760	da -50 a 1760	da 20 a 1760
S	da -50 a 1760	da -50 a 1760	da 20 a 1760
T	da -270 a 400	da -270 a 400	da -250 a 400

TABELLA 1: diversi tipi di termocoppie.

Nelle analisi compiute, per ricavare il valore di temperatura è stata usata la termocoppia di tipo K. Essa è di applicazione generica ed è di basso costo e disponibile in molte varianti con un range di temperatura misurata che va da -200°C a +1.200°C e la sensibilità è di 41 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

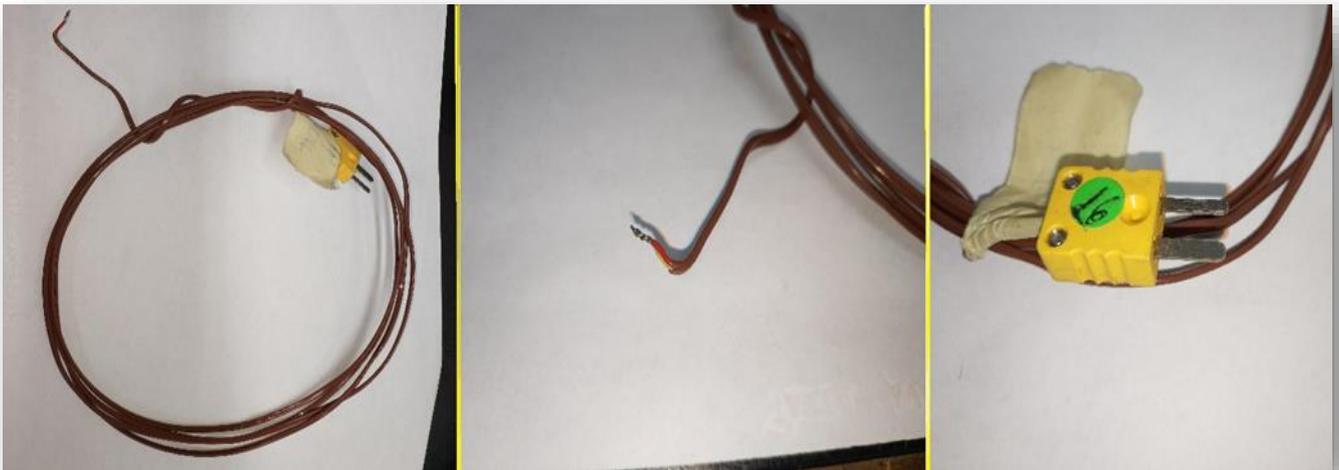


FIGURA 35: termocoppia di tipo K, usata per percepire i valori di temperatura.

2.2.4 TRASDUTTORE DI PRESSIONE

Un trasduttore di pressione converte la pressione in un segnale elettrico analogico. La conversione da pressione in un segnale elettrico viene ottenuta dalla deformazione fisica degli estensimetri connessi alla membrana del trasduttore di pressione e cablati in una configurazione a ponte di Wheatstone.



La pressione applicata al trasduttore di pressione produce una flessione del diaframma che a sua volta porta alla deformazione degli estensimetri. La deformazione produrrà un cambiamento della resistenza elettrica proporzionale alla pressione stessa.

FIGURA 36: trasduttore di pressione.

La pressione applicata al trasduttore di pressione produce una flessione del diaframma che a sua volta porta alla deformazione degli estensimetri. La deformazione produrrà un cambiamento della resistenza elettrica proporzionale alla pressione stessa.

2.2.5 SENSORE DI UMIDITA'

I sensori di umidità sono dispositivi per la misura e il monitoraggio dell'umidità in diverse applicazioni. L'umidità, definita come la percentuale di acqua presente in un determinato volume di aria, è un elemento importante per l'analisi in quanto tale quantità di acqua va ad influenzare il tempo di congelamento del condensatore. I sensori di umidità sono dei dispositivi in grado di misurare l'umidità presente nell'ambiente circostante.



Da un punto di vista tecnico, i sensori di umidità possono essere classificati in sensori di umidità assoluta (AH) e in sensori di umidità relativa (RH).

FIGURA 37: sensore di umidità relativa utilizzato durante le prove.

Dal punto di vista elettrico, i sensori di umidità possono invece essere classificati in sensori capacitivi oppure resistivi. Nel caso in esame è stato utilizzato un sensore di tipo resistivo come in figura 37. Dal punto di vista costruttivo, un sensore di umidità resistivo è solitamente realizzato utilizzando dei materiali con resistività relativamente bassa in modo tale da avere una maggiore sensibilità, con relazione tra resistenza e umidità di tipo inversamente proporzionale. Il materiale a bassa resistività viene depositato sopra i due elettrodi, i quali vengono disposti seguendo uno schema interlacciato (a pettine) in modo tale da incrementare il più possibile l'area di contatto. Quando lo strato superiore assorbe umidità, la resistività tra gli elettrodi cambia e tale variazione può poi essere misurata e convertita in valore numerico attraverso un opportuno circuito elettrico. Come materiale a bassa resistività si possono utilizzare particolari tipi di sali, polielettroliti solidi, oppure polimeri conduttivi. I più moderni sensori di umidità resistivi sono protetti esternamente da uno strato ceramico che garantisce una protezione addizionale mentre gli elettrodi del sensore sono invece realizzati con metalli nobili come oro, argento o platino.

Tra i principali vantaggi offerti dai sensori di umidità resistivi possiamo citare:

- costo ridotto;
- dimensioni compatte;
- elevata intercambiabilità in quanto i sensori non richiedono alcuna calibrazione;
- possibilità di collocare i sensori anche ad elevate distanze rispetto al circuito elettrico di controllo e misura;
- il limite di questi sensori è la loro sensibilità ai vapori chimici e ad altre sostanze contaminanti.

2.2.6 ANEMOMETRO A FILO CALDO

L'anemometro è un sensore che permette la misura della velocità di un fluido e tale strumento è usato in un numero elevato di applicazioni (dal campo meteorologico a quello motoristico). Esistono diverse tipologie di sensori di questo tipo:

- Anemometri a rotazione o meccanici, basati sulla misurazione della frequenza di rotazione di un mulinello esposto al vento; tale tipologia trova maggiore applicazione nel campo meteorologico.
- Anemometri a laser-Doppler, mediante i quali si rilevano le variazioni di frequenza delle radiazioni laser diffuse dalle particelle che si trovano nella corrente fluida di cui si vuole misurare la velocità.
- Anemometri a filo caldo, più pronti e sensibili rispetto ai precedenti, sfruttano la variazione di resistenza dovuto alla variazione di temperatura di un conduttore, in cui viene fatta passare della corrente.

Nel caso in esame, per la stima della velocità del flusso di aria che arriva nel cooling module (sistema costituito da radiatore, condensatore e ventola), sono stati usati gli anemometri a filo caldo. Il sensore è percorso, come già detto, da un valore di corrente che, in mancanza di portata e data una certa resistenza del materiale, è tale da mantenere la temperatura della sonda a un determinato valore. Quando invece passa una certa portata di aria su di esso, essa tende a raffreddarlo (per effetto dello scambio termico convettivo). Tale raffreddamento è funzione, oltre che delle caratteristiche termiche, anche della velocità del fluido. Grazie a questo aspetto è possibile correlare la velocità del fluido con la corrente in quanto, in base alla variazione di essa, è possibile risalire alla velocità. Infatti maggiore è la velocità dell'aria, maggiore sarà lo scambio termico e maggiore sarà dunque il raffreddamento.

Dunque dovendo mantenere costante la temperatura, deve aumentare la corrente per poter compensare tale raffreddamento (per effetto Joule, maggiore è la corrente e maggiore sarà la potenza dissipata).

Sfruttando dunque tale principio, è possibile calibrare la sonda in modo da



avere una correlazione tra la corrente che passa dalla sonda e la velocità del fluido stesso.

FIGURA 38: anemometri a filo caldo usati per le prove.

2.2.7 DERIVATORE DI CORRENTE O SHUNT

Per la stima del funzionamento della ventola e per determinare il suo consumo energetico, conoscendo il valore di tensione a cui è alimentata (13,5 V), si può ricavare il valore di corrente utilizzando lo shunt. Lo shunt o derivatore di corrente è una resistenza elettrica che devia attraverso di sé una parte più o meno consistente della corrente circolante in un circuito



principale a cui è posto in parallelo. L'entità della corrente deviata dipende dal valore resistivo dello shunt rispetto al circuito in parallelo.

FIGURA 39: Shunt utilizzato per la stima della corrente assorbita dalla ventola.

2.2.8 MODULI DI ACQUISIZIONE IPETRONIK

La presenza dei sensori e degli strumenti di misura è indispensabile per reperire le informazioni e i dati sul sistema utili per poter compiere le analisi. Una volta che tali informazioni (temperatura, pressione, corrente, ecc...) vengono percepite da tali strumenti, occorre un sistema che consente di acquisire e trasformare i segnali in dati che verranno successivamente trasferiti nel computer. Questo avviene grazie alla presenza dei moduli posti nel vano motore, rappresentati in figura 40.A; in essi sono collegati tutti gli attacchi degli strumenti di misura montati nei vari punti del sistema. Le informazioni vengono successivamente trasferite tramite un opportuno cavo al personal computer posto fuori la galleria (figura 40.B). Questo sistema dunque consente di collegare due ambienti differenti: la galleria del vento, in cui vengono create le condizioni ambientali critiche, e la sala di controllo. I dati, provenienti dai moduli, vengono successivamente elaborati attraverso un programma chiamato *IPEmotion*.

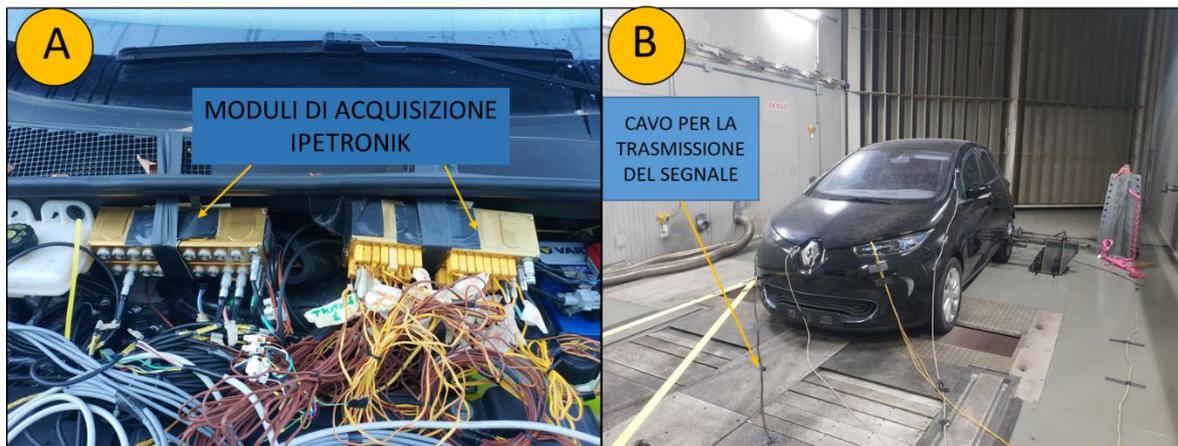


FIGURA 40: sistema che consente di elaborare i dati proveniente dagli strumenti di misura. A. Moduli di acquisizione. B. Veicolo posizionati in galleria durante le prove.

Infine è importante citare il software *DDT2000* che permette di acquisire i dati direttamente dalla centralina. Tramite esso è infatti possibile acquisire informazioni quali: numero di giri compressore, velocità del veicolo, livello di carica della batteria ecc.

2.3 TIPOLOGIA E NUMERO DI PROVE

Per la verifica del funzionamento del sistema sono state compiute due tipologie di prove:

- La prima parte è caratterizzata nella verifica del sistema con un andamento del veicolo a velocità costante per un tempo sufficientemente lungo da poter verificare la presenza della fase icing (vedi capitolo 1.4 “effetti sulla formazione di ghiaccio”).
- La seconda parte è caratterizzata nella verifica del sistema facendo compiere al veicolo il ciclo guida WLTP, verificando il funzionamento del sistema con una guida reale. Inoltre lo scopo della prova è anche la verifica della presenza, grazie al sistema di air flow management, di un risparmio energetico della batteria.

In entrambe tipologie di prove è stato fatto un confronto tra il veicolo in normale produzione (veicolo senza modifiche) e il veicolo con il sistema AFM (veicolo con le modifiche che sono state descritte all’inizio di questo capitolo). In questo modo si riesce a mettere in risalto il differente comportamento del sistema A/C nei due casi.

CAPITOLO 3

PROVE A VELOCITA' COSTANTE

3.0 PREPARAZIONE PROVE

3.0.1 MONTAGGIO DELLE SONDE

Per poter reperire con maggiore facilità ed efficacia i dati, i sensori devono essere montati con una certa logica in modo da ottenere le informazioni desiderate in modo chiaro e conciso. In figura 41 è presente uno schema che mostra la disposizione delle termocoppie e degli anemometri nel sistema.

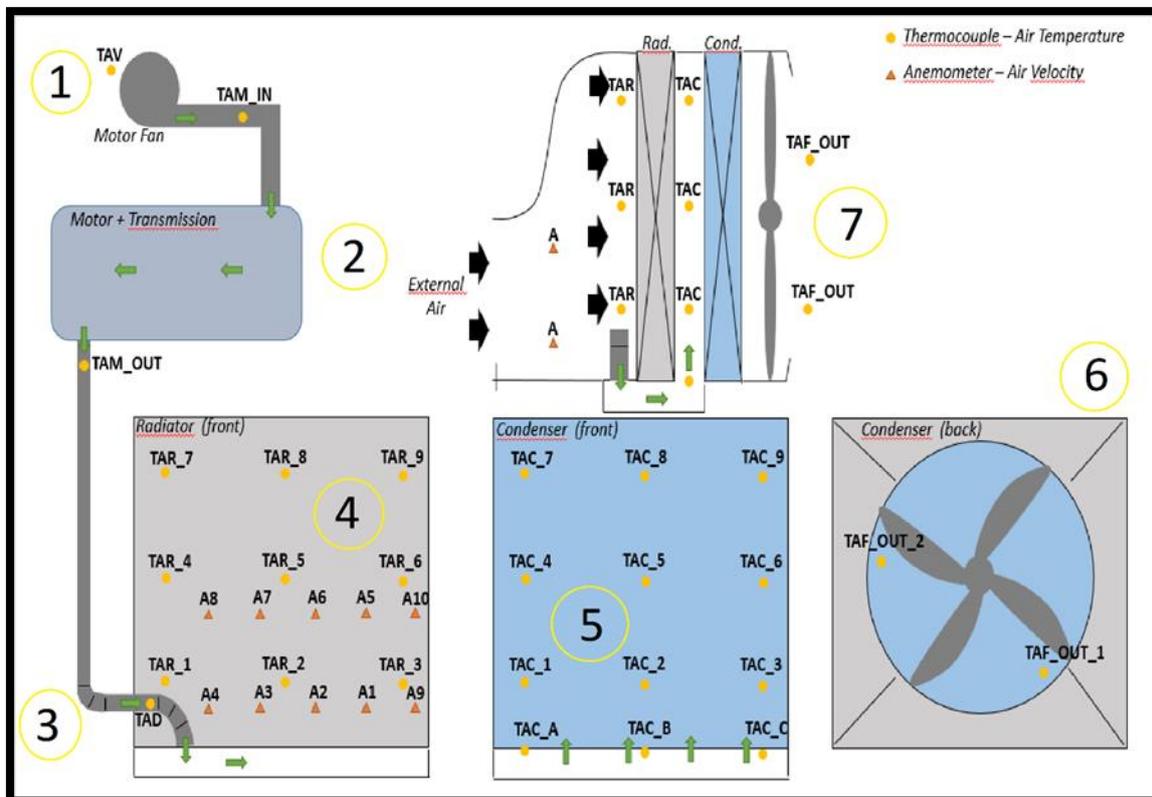


Figura 41: disposizione termocoppie e anemometri nel sistema in esame. 1. Ventola in cui è presente una termocoppia all'aspirazione; 2. Due Termocoppie montate in ingresso ed uscita motore; 3. Una termocoppia posta nel condotto che convoglia il flusso nel convogliatore; 4. Nove termocoppie e 10 anemometri disposti di fronte al radiatore; 5. Dodici termocoppie disposte nel condensatore tra cui sono presenti anche tre termocoppie in prossimità del convogliatore; 6. Due termocoppie in uscita dal condensatore. 7. Sistema in vista laterale.

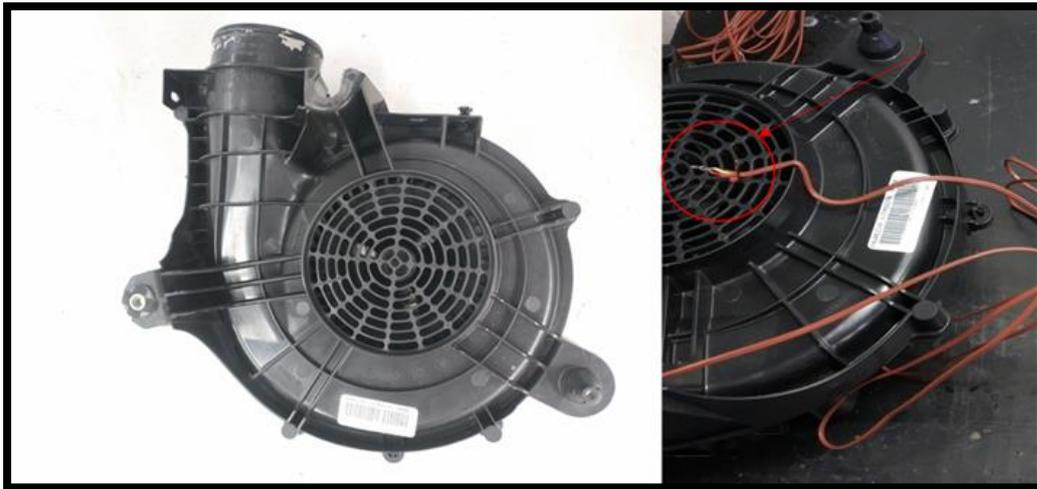
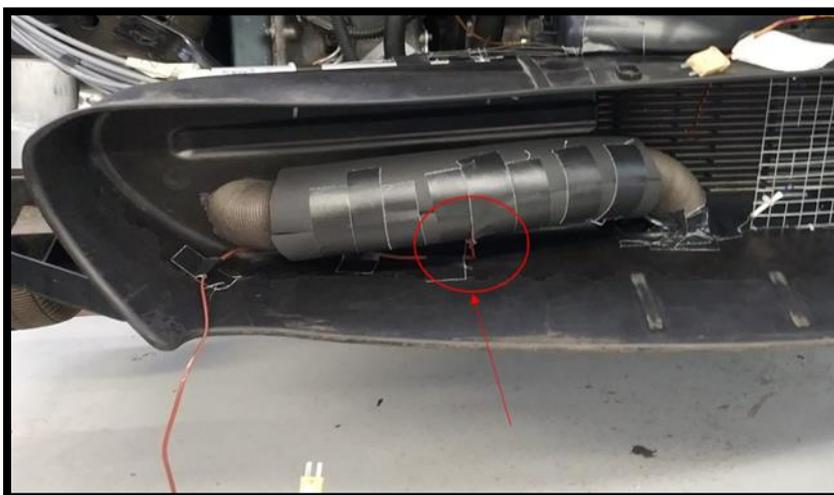


FIGURA 42: TAV: Termocoppia disposta all'aspirazione della ventola.



*FIGURA 43: TAM_IN:
Termocoppia disposta nel
condotto in ingresso del
motore.*



*FIGURA 44:
TAD:
Termocoppia
disposta in
ingresso del
convogliatore.*

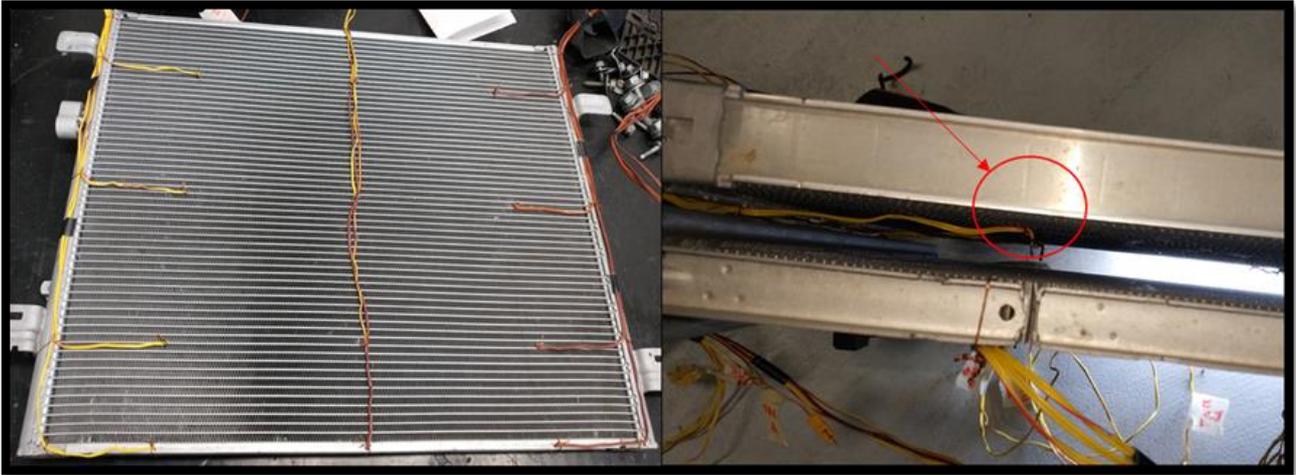


FIGURA 45: TAR e TAC: termocoppie disposte lungo la superficie del radiatore e condensatore.



FIGURA 46: anemometri disposti di fronte al veicolo per la misura del flusso di aria che entra nel cooling module.

Oltre alle termocoppie ed agli anemometri appena mostrati, per reperire informazioni sulla temperatura e la pressione del refrigerante in uscita dal condensatore esterno, è stata montata una termocoppia e un trasduttore di pressione in uscita di esso. Inoltre grandezze come numero di giri o comando del *de-icing* sono state acquisite direttamente dalla centralina del sistema pompa di calore.

Nella tabella 2 è presente la lista di tutti i sensori e strumenti di misura montati in diversi punti.

Numero	Nome sensore	Posizione	Tipo di misura	Tipo di sensore	Numero	Nome sensore	Posizione	Tipo di misura	Tipo di sensore
1	TAV	Ingresso ventola motore	Temperatura	Termocoppia	17	TAC_1	Superficie condensatore	Temperatura	Termocoppia
2	TAM_IN	Ingresso motore	Temperatura	Termocoppia	18	TAC_2	Superficie condensatore	Temperatura	Termocoppia
3	TAM_OUT	Uscita motore	Temperatura	Termocoppia	19	TAC_3	Superficie condensatore	Temperatura	Termocoppia
4	TAD	Ingresso convogliatore	Temperatura	Termocoppia	20	TAC_4	Superficie condensatore	Temperatura	Termocoppia
5	TAR_1	Superficie radiatore	Temperatura	Termocoppia	21	TAC_5	Superficie condensatore	Temperatura	Termocoppia
6	TAR_2	Superficie radiatore	Temperatura	Termocoppia	22	TAC_6	Superficie condensatore	Temperatura	Termocoppia
7	TAR_3	Superficie radiatore	Temperatura	Termocoppia	23	TAC_7	Superficie condensatore	Temperatura	Termocoppia
8	TAR_4	Superficie radiatore	Temperatura	Termocoppia	24	TAC_8	Superficie condensatore	Temperatura	Termocoppia
9	TAR_5	Superficie radiatore	Temperatura	Termocoppia	25	TAC_9	Superficie condensatore	Temperatura	Termocoppia
10	TAR_6	Superficie radiatore	Temperatura	Termocoppia	26	TAF_OUT_1	Uscita ventola cooling module	Temperatura	Termocoppia
11	TAR_7	Superficie radiatore	Temperatura	Termocoppia	27	TAF_OUT_2	Uscita ventola cooling module	Temperatura	Termocoppia
12	TAR_8	Superficie radiatore	Temperatura	Termocoppia	28	A1	Ingresso cooling module	Velocità	Anemometro
13	TAR_9	Superficie radiatore	Temperatura	Termocoppia	29	A2	Ingresso cooling module	Velocità	Anemometro
14	TAC_A	Uscita convogliatore	Temperatura	Termocoppia	30	A3	Ingresso cooling module	Velocità	Anemometro
15	TAC_B	Uscita convogliatore	Temperatura	Termocoppia	31	A4	Ingresso cooling module	Velocità	Anemometro
16	TAC_C	Uscita convogliatore	Temperatura	Termocoppia	32	A5	Ingresso cooling module	Velocità	Anemometro
17	TRC_OUT	Uscita condensatore	Temperatura	Termocoppia	33	A6	Ingresso cooling module	Velocità	Anemometro
18	PRC_OUT	Uscita condensatore	Pressione	Trasduttore	34	A7	Ingresso cooling module	Velocità	Anemometro
19	RH	Ingresso cooling module	Umidità	Sensore umidità	35	A8	Ingresso cooling module	Velocità	Anemometro
20	IV	In prossimità ventola motore	Corrente	Shunt	36	A9	Ingresso cooling module	Velocità	Anemometro
21	TEM_INT	Uscita condensatore interno	Temperatura	Termocoppia	37	A10	Ingresso cooling module	Velocità	Anemometro

TABELLA 2: lista degli strumenti di misura disposti in vari punti per reperire le informazioni per l'analisi.

3.0.2 CONDIZIONI DELLE PROVE A VELOCITA' COSTANTE



FIGURA 47: Veicolo montato in galleria climatica durante le prove.

Per verificare il funzionamento del sistema AFM, il veicolo è stato fatto lavorare in galleria climatica. In questo modo, oltre a simulare l'andamento del veicolo in strada (grazie alla presenza dei rulli che impongono il carico alle ruote), si può anche simulare il funzionamento di esso a determinate temperature e condizioni climatiche (tali da rendere critico il funzionamento della pompa di calore).

In questo modo dunque si possono creare le condizioni per il quale nel condensatore si viene a formare lo strato di ghiaccio e quindi si può studiare l'effetto del flusso di aria calda proveniente dal motore. Le prove a velocità costante, come già detto alla fine del capitolo precedente, sono servite per una prima stima del funzionamento del sistema AFM. In particolare hanno

permesso di capire se, in base a due differenti velocità, mantenute costanti, si presenta la fase *icing* (fase critica del sistema pompa di calore).

Le caratteristiche delle prove a velocità costante sono riassunte nella tabella 3.

N. PROVE	VELOCITA' VEICOLO [km/h]	TEMPERATURA E UMIDITA' DELL'ARIA	CONTROLLO VENTOLA MOTORE	CARICO MOTORE [KW]	DURATA PROVA [min]
1	40	5°C	Manuale*	2,2	160
2			Automatica**		
3	20	95%	Manuale*	1,0	140
4			Automatica**		

TABELLA 3: condizioni della prima tipologia di prova.

Sono state effettuate 4 prove a due livelli di velocità costante seguendo le due seguenti modalità (vedi figura 48):

- *Manuale*: in tale modalità la ventola viene controllata dall'esterno con un comando di tipo on/off (vedi figura 49). In queste prove, il veicolo è in configurazione AFM (struttura descritta nel capitolo precedente).
- *Automatico*: in tale modalità la ventola del motore è controllata dal sistema di controllo del veicolo stesso. Inoltre il veicolo è in configurazione "normale produzione".

Attraverso le due modalità è dunque possibile mettere a confronto il veicolo in normale produzione con il veicolo che ha subito modifiche per convogliare il flusso di aria in prossimità del condensatore esterno. Inoltre è importante sottolineare che a differenza del caso automatico, in cui la ventola e dunque il flusso termico è comandato dal veicolo stesso, nel caso manuale, come già detto, la ventola è controllata dall'esterno dall'operatore che aziona essa ad intermittenza (controllo on/off ad intervalli di tempo fissati). In aggiunta, tale ventola, non essendoci il PWM, si attiverà al massimo delle sue prestazioni e funzionerà al massimo del consumo. Infine, in riferimento alla tabella 3, per mettere il veicolo nelle condizioni critiche, è stata imposta una temperatura di 5 °C e un'umidità del 95%.

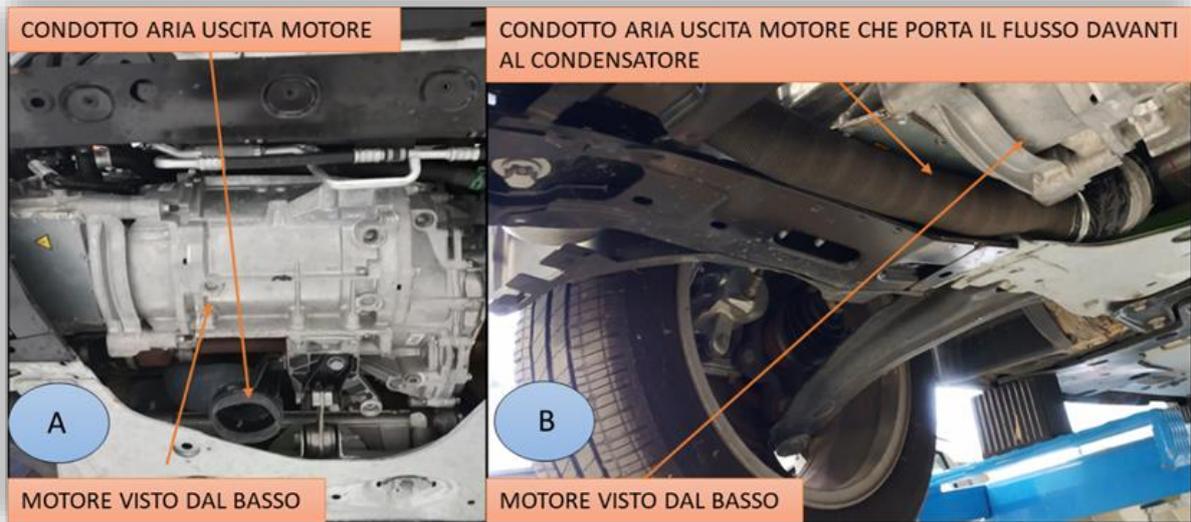


FIGURA 48: confronto tra automatico e manuale: A. nelle prove in automatico nel veicolo non sono presenti modifiche e la ventola è controllata dal sistema di controllo del veicolo stesso. B. nel caso manuale invece il veicolo è soggetto a modifiche e il flusso viene convogliato sul condensatore esterno.

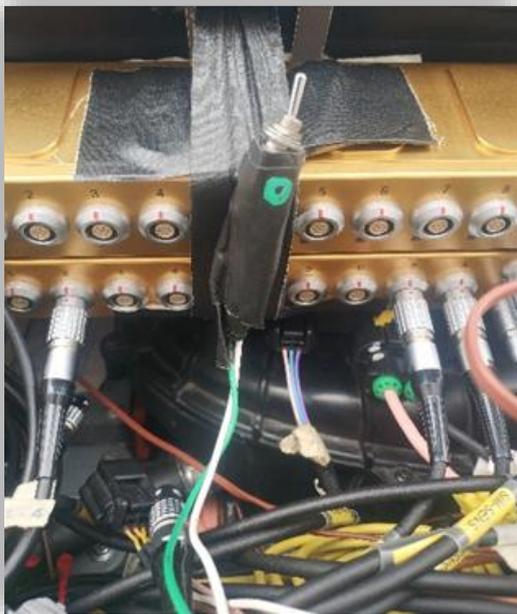


FIGURA 49: pulsante utilizzato per il comando on/off della ventola motore.

3.1 RISULTATI DELLE PROVE A VELOCITA' COSTANTE

Sono molte le grandezze da analizzare per poter trarre qualche conclusione. Esse sono legate al refrigerante, al sistema pompa di calore e al veicolo stesso. In particolare, tali grandezze verranno messe a confronto tra di loro per poter capire quale effetto ognuna di esse determina sulle altre. Inoltre l'effetto dipende anche dalla velocità del veicolo, ovvero dal carico del motore: logicamente, maggiore è il carico del motore, maggiore sarà il suo riscaldamento e dunque maggiore è l'effetto dell'aria calda sul condensatore esterno.

3.1.1 RISULTATI DELLE PROVE A 40 km/h

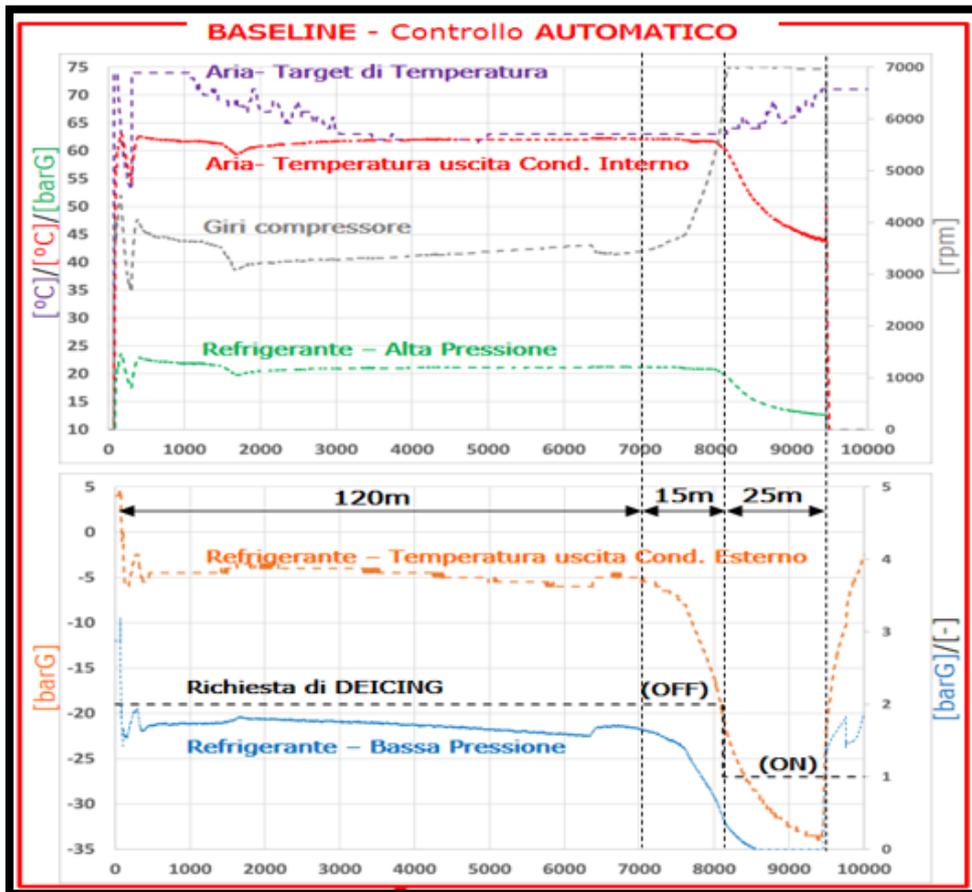


FIGURA 50: rappresentazione delle grandezze fondamentali nel caso automatico a 40 km/h.

I risultati a 40 km/h si sono dimostrati molto interessanti: con una durata della prova di 160 minuti (vedi tabella 3), si riesce a individuare la fase *icing* nel caso manuale (vedi figura 50) mentre risulta totalmente assente nel caso automatico (vedi figura 51). Si consideri inizialmente la prova in normale

produzione ovvero la prova in cui il veicolo non ha subito modifiche. In esso infatti il sistema pompa di calore, dopo un arco di tempo di 120 minuti, inizia a risentire della presenza dello strato di ghiaccio nel condensatore. In riferimento alla figura 50 dopo tale tempo, la temperatura dell'aria misurata all'uscita del condensatore interno inizia ad abbassarsi.

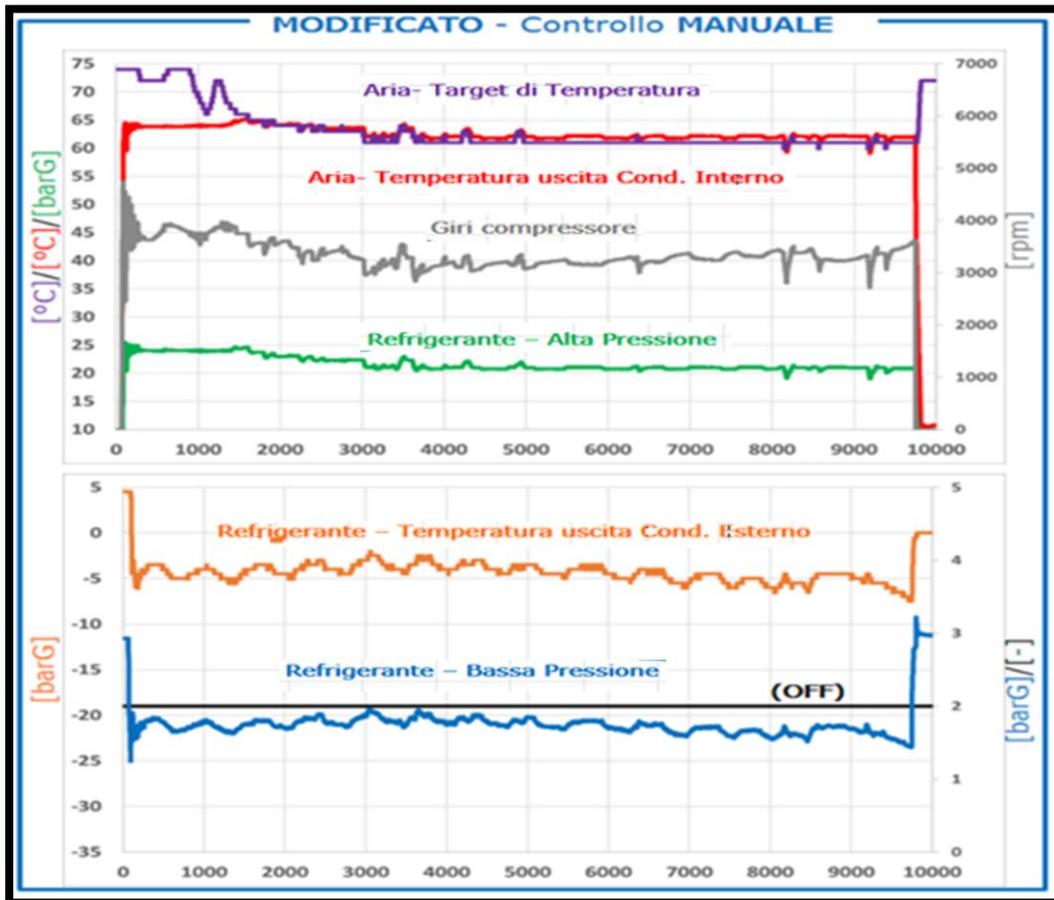


FIGURA 51: rappresentazione delle grandezze fondamentali nel caso manuale a 40 km/h.

Durante tale fase, che ha una durata di 15 minuti, il sistema agisce per compensare tale abbassamento di temperatura aumentando il numero di giri del compressore e quindi il suo consumo (vedi capitolo 1, formula 1). Ciò è inoltre accompagnato da un abbassamento della temperatura e della pressione del refrigerante all'uscita del condensatore esterno. Infine, non potendo più compensare l'abbassamento di temperatura, dopo 135 minuti viene mandato il comando del *de-icing*.

In riferimento alla figura 51 invece, nel caso manuale la fase *icing* è completamente assente. Dunque tutto quello che è stato detto per il caso

automatico non si verifica: la temperatura e la pressione del refrigerante in uscita dall'evaporatore rimangono pressoché costanti durante la durata della prova e con esso anche il numero di giri. Ciò è un segno che durante il funzionamento in manuale, attivando ad intermittenza la ventola e mandando aria calda dal motore al condensatore, lo strato di ghiaccio formatosi non è tale da dare inizio alla fase critica.

Quindi con i risultati ottenuti nella prova in manuale, si può trarre la conclusione che si riesce ad ottimizzare il flusso termico ed in particolare si riesce a sfruttare in modo adeguato il flusso di aria dal motore. Infine, un'osservazione interessante è che nel caso automatico a 40 km/h, andando ad analizzare i valori di corrente ottenuti grazie allo shunt, si intuisce che la ventola del motore non è mai partita.

3.1.2 RISULTATI DELLE PROVE A 20 km/h

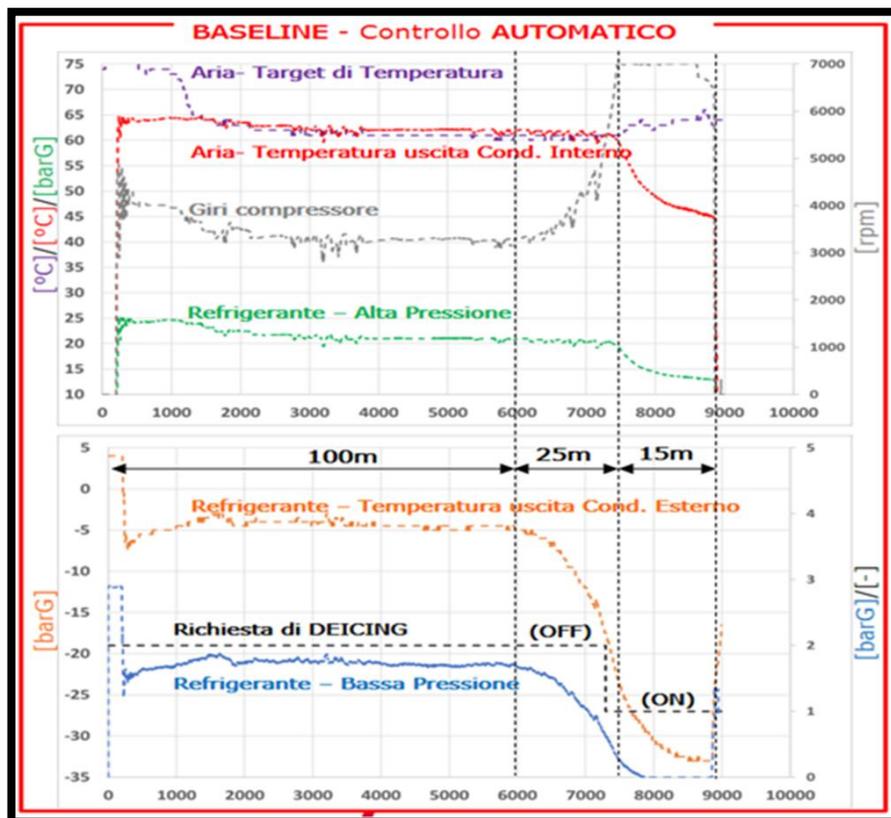


FIGURA 52: rappresentazione delle grandezze fondamentali nel caso automatico a 20km/h.

Come è possibile constatare in figura 52 e 53, nelle prove compiute a 20 km/h non si presentano risultati interessanti. Infatti, facendo un confronto tra le due modalità, non si hanno evidenti differenze: in entrambi i casi, dopo un tempo più o meno simile, avviene la fase *icing*. Dunque si potrebbe dire che

nel caso manuale, nonostante la presenza del flusso di aria proveniente da motore, esso non è sufficientemente caldo da evitare la formazione critica dello strato di ghiaccio e ciò è dovuto al basso carico del motore (esso non scalda abbastanza da evitare la fase critica).

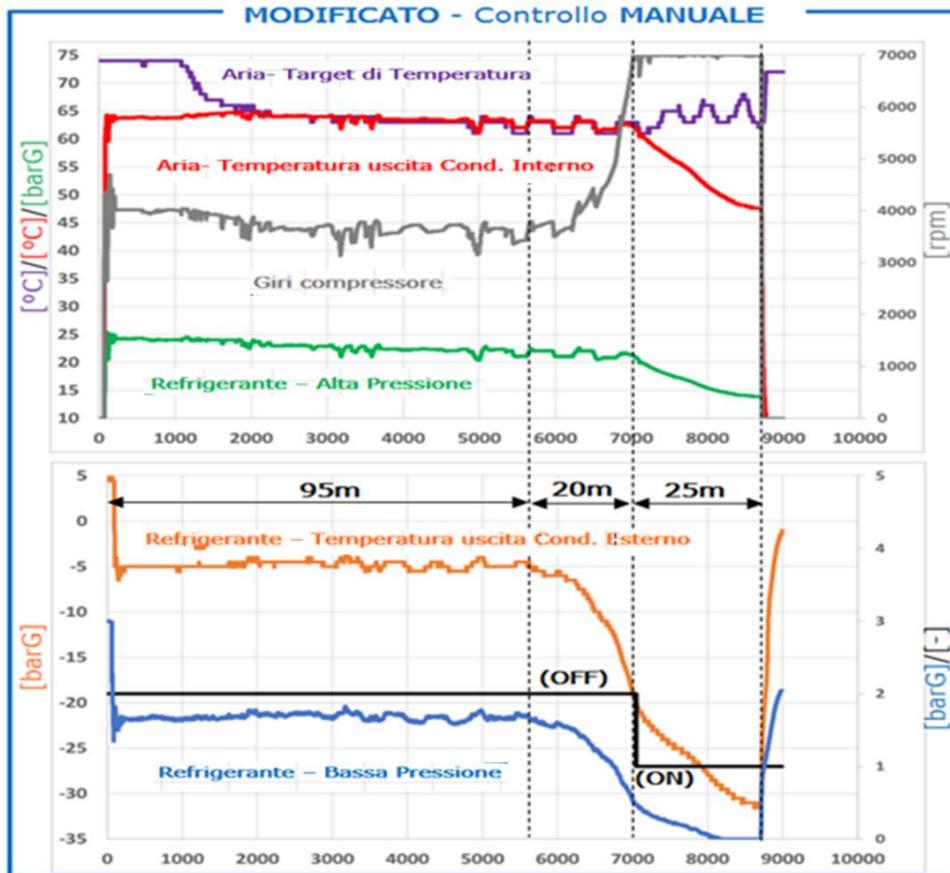


FIGURA 53: rappresentazione delle grandezze fondamentali nel caso manuale a 20km/h.

3.1.3 ANDAMENTO TEMPERATURE DEL MOTORE

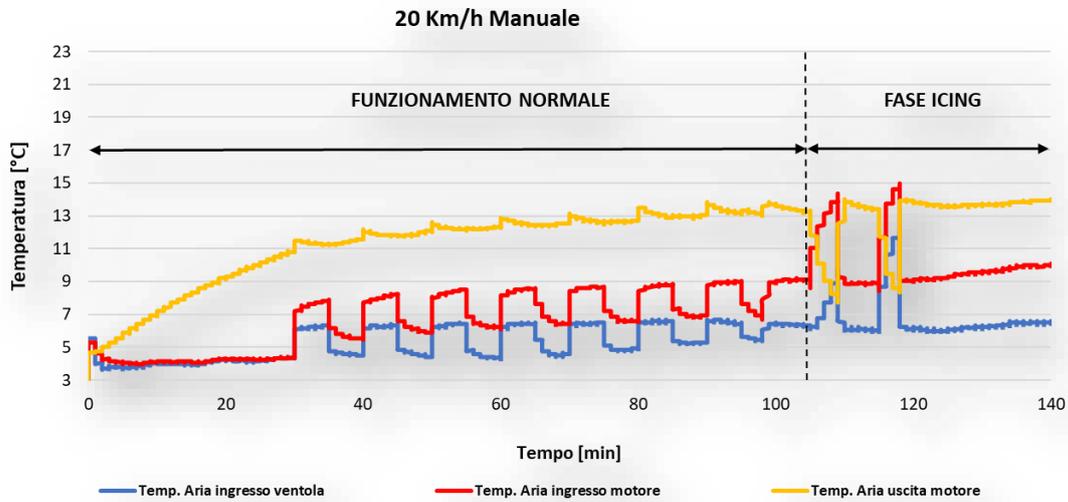


FIGURA 54: andamento delle temperature in prossimità del motore nella prova a 20 km/h in manuale.

È interessante analizzare le temperature raggiunte nel motore e dunque dal flusso di aria in uscita da esso. Esse sono state acquisite grazie alla presenza delle termocoppie disposte in ingresso ed uscita dal motore e all’aspirazione della ventola (vedi paragrafo 3.0 “montaggio delle sonde”). In relazione alla figura 53, nel caso manuale a 20 km/h, l’attivazione della ventola determina i picchi di temperatura che aumenta fino ad un massimo di circa 15 °C. Successivamente dopo un tempo di circa 105 minuti, la formazione dello strato di ghiaccio nel condensatore è tale da ostacolare il flusso di aria la quale una parte di essa passa dal modulo verso il motore attraverso il condotto (ecco spiegato il cambio di comportamento dopo tale tempo, in figura 54).

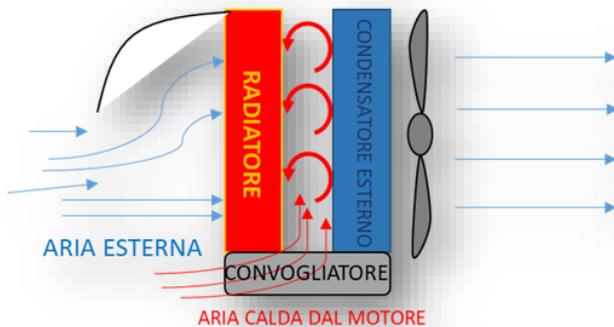


FIGURA 55: schema rappresentativo dei flussi di aria che entrano ed escono dal cooling module.

Per capire tale fenomeno si osservi la figura 55 dove sono presenti i flussi di aria che interagiscono in prossimità del condensatore. In esso infatti, se si

viene a formare lo strato di ghiaccio, il flusso di aria proveniente dall'esterno incontra difficoltà nel passaggio ed una parte si muove dal convogliatore al motore creando un flusso opposto (vedi figura 59). In tal modo infatti si registra un incremento di temperatura in ingresso motore mentre la temperatura in uscita da esso diminuisce. Quando la ventola viene nuovamente azionata si registra nuovamente l'inversione delle temperature dovuto al fatto che la ventola del motore spinge aria in direzione opposta.

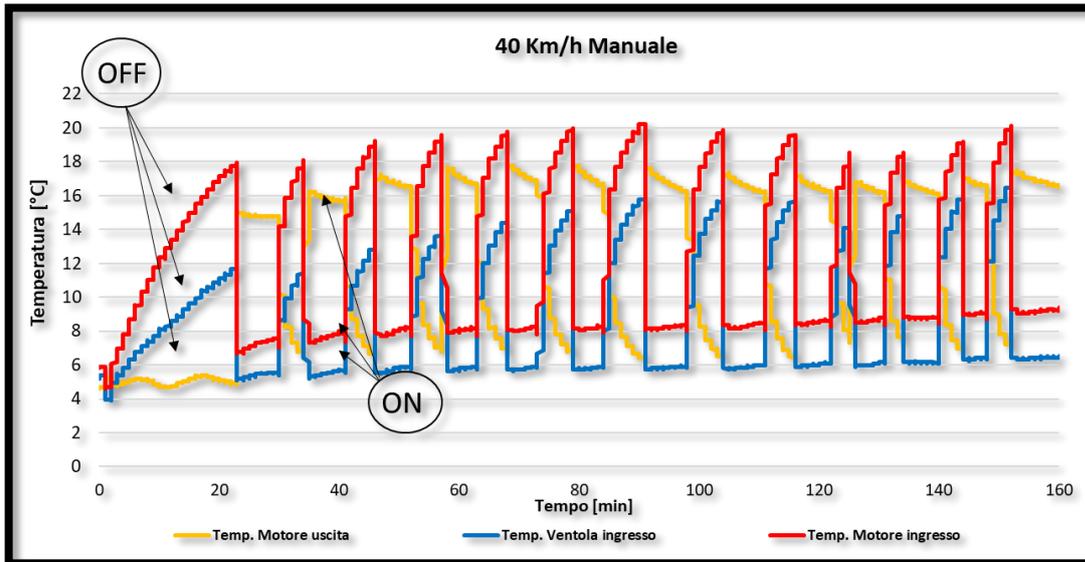


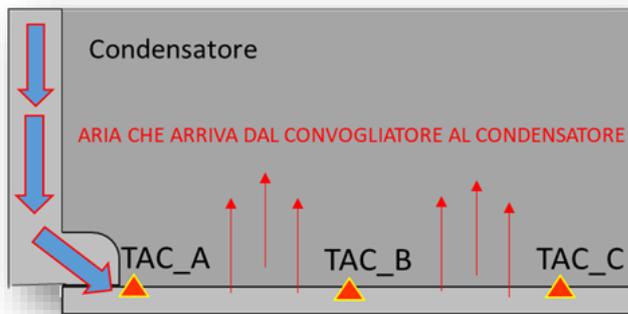
FIGURA 56: andamento temperature in prossimità del motore nelle prove a 40km/h in manuale.

Per quanto riguarda il caso a 40 km/h la situazione cambia. Innanzitutto le temperature raggiunte risultano essere più alte superando anche i 20 °C. Inoltre, osservando gli andamenti delle temperature acquisite dalle termocoppie, sembra che il flusso di aria, quando la ventola motore non è azionata, passa dal modulo al motore facendo registrare il massimo delle temperature in ingresso di esso (vedi figura 59). Ciò è spiegato dal fatto che, a differenza del caso a 20 km/h in cui flusso di aria esterna entra nel cooling module a velocità più basse, e questo porterebbe a un effetto venturi in prossimità del convogliatore, registrando un flusso che va dal motore al condensatore quando la ventola motore non è attivata e non si è ancora formato lo strato critico di ghiaccio, nel caso a 40 km/h, la velocità dell'aria porta, per effetto della pressione dinamica, a far fluire l'aria in senso opposto (andando dal convogliatore al motore). Quando si aziona la ventola, l'effetto di essa determina il comportamento opposto e dunque si registra l'andamento variabile come in figura 56. La pressione dinamica dipende dal quadrato

della velocità (vedi formula (8)) e dunque tale effetto aumenta all'aumentare della velocità del vento.

$$q = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (8)$$

Infine il fatto che la prova a 20 km/h non ha affetti interessanti rispetto al caso a 40 km/h è dovuto alla temperatura raggiunta nel motore; infatti nel caso a 40 manuale il flusso di aria nel condensatore raggiunge temperature decisamente più alte. Conferma di ciò si ottiene nell'analisi delle temperature percepite dalle termocoppie poste in prossimità del condensatore (vedi paragrafo 3.0 "montaggio delle sonde"). In riferimento alla figura 57, l'aria dal convogliatore arriva verso il condensatore e passa dalle tre termocoppie



poste sulla base di esso. Da come si vede dalla figura 58, le temperature raggiunte nel caso manuale a 40km/h risultano essere più alte dal caso a 20km/h manuale.

FIGURA 57: posizione delle termocoppie sulla base del condensatore esterno.

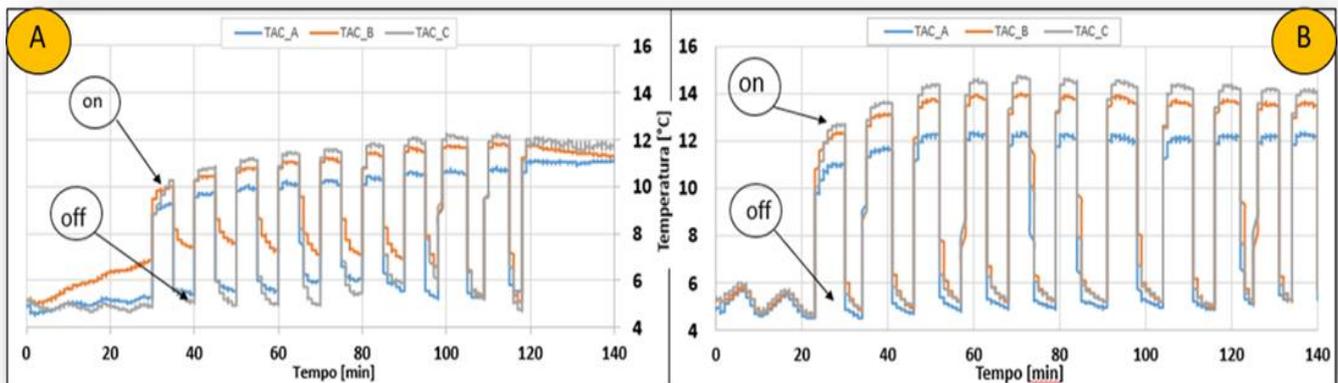


FIGURA 58: Temperature acquisite dalle termocoppie poste alla base del condensatore esterno: A. caso a 20km/h manuale; B. caso a 40km/h manuale.

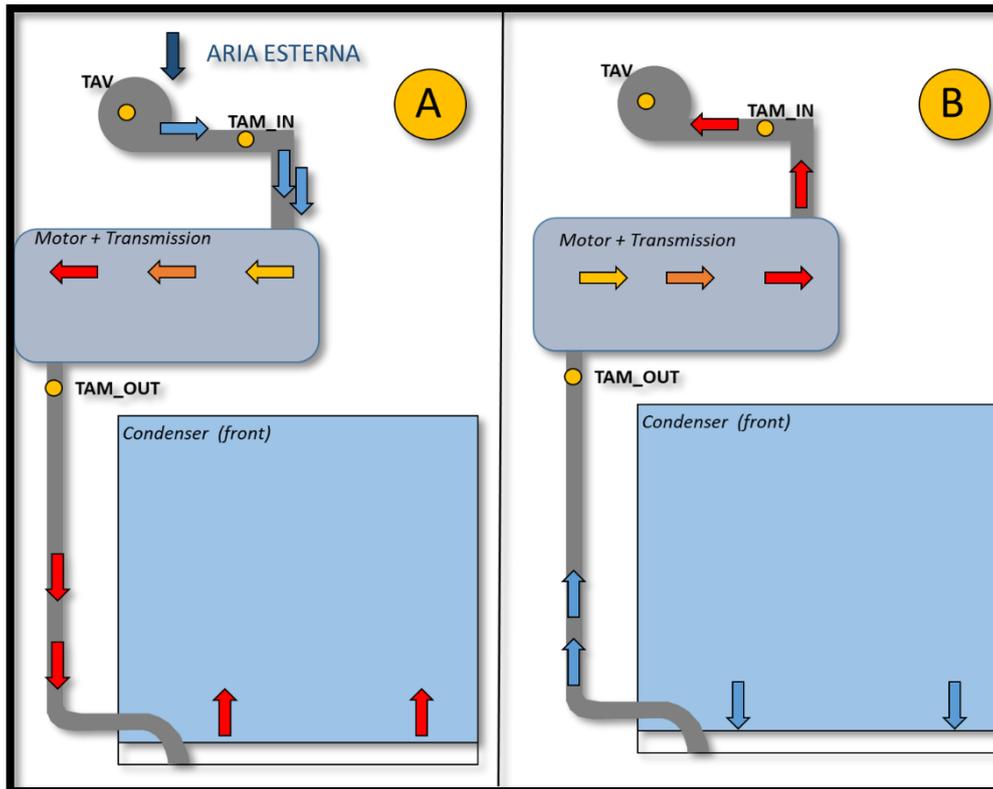


FIGURA 59: schema del sistema in cui è mostrata la direzione dell'aria nelle diverse condizioni: A. l'aria si muove dalla ventola al convogliatore e questo avviene o per un possibile effetto venturi o per l'effetto dell'attivazione della ventola; B. l'aria si muove in direzione opposta andando dal condensatore al motore.

3.2 CONCLUSIONE PRIME PROVE

Dai risultati ottenuti dalle prime prove si può concludere che il sistema ha un comportamento interessante per le prove a 40 km/h in manuale, ovvero per carichi del motore maggiori. In generale però tali prove da sole non possono dare conferma del funzionamento del sistema AFM. Infatti, ad esempio, per poter capire se tale sistema dà benefici in termini energetici, occorre compiere un'analisi SOC (state of charge), ovvero mettere a confronto il livello di carica finale durante la prova in manuale ed automatico a partire dalla stessa carica e verificare se si riesce ad ottenere un risparmio energetico. Inoltre le prime prove sono caratterizzate da velocità costante per un determinato arco di tempo ma, nella realtà, un veicolo non avrà mai un andamento di questo tipo e sarà soggetto a continue accelerazioni e decelerazioni. Le prove successive tengono conto proprio di questo, facendo compiere al veicolo il ciclo guida WLTP e verificando la percentuale di carica iniziale e finale del veicolo, facendo un confronto tra il veicolo senza

modifiche e il veicolo con il sistema AFM. Inoltre, nelle prime prove, la ventola è stata fatta funzionare al massimo delle sue prestazioni, lavorando con la massima portata di aria. Ciò porta ad un incremento del consumo elettrico da parte della ventola che potrebbe incidere negativamente sulla batteria, nonostante si riesce a ridurre il consumo del compressore. Anche tale aspetto verrà preso in considerazione nelle prove successive, andando a regolare la velocità della ventola grazie ad un generatore di PWM.

CAPITOLO 4

PROVE CON CICLO GUIDA

4.0 INTRODUZIONE DELLE PROVE CON CICLO GUIDA

4.0.1 CARATTERISTICHE DELLE PROVE CON CICLO GUIDA

Le sole prove a velocità costante non sono tali da trarre importanti conclusioni e nasce dunque la necessità di studiare il sistema in modo diverso. Le operazioni compiute nelle prove con ciclo guida sono:

1. *Ciclo WLTP* → utile a simulare una guida reale su strada.
2. *Analisi SOC* → confronto della scarica della batteria tra il veicolo senza modifiche e il veicolo con sistema di AFM.
3. *PWM* → mentre nelle prove precedenti la ventola veniva controllata solo con comando on/off, spingendo la ventola alla massima potenza, nelle nuove prove la ventola è stata controllata utilizzando un generatore PWM (vedi figura 60).

Le prove a velocità costante non permettono di avere la sicurezza dei benefici ottenuti (vedi paragrafo 3.1 “Risultati delle prove a velocità costante”), in quanto non rappresentano i cicli guida reali della vita del veicolo: è necessario quindi simulare l’andamento realistico utilizzando il ciclo guida WLTP (Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure), che imita un andamento in strada, con guida in città e nei tratti extraurbani, garantendo continue accelerazioni e decelerazioni.

L’analisi SOC invece consiste, come già spiegato, nel confronto della scarica della batteria tra il veicolo con sistema AFM e il veicolo senza modifiche, cercando di individuare un eventuale risparmio energetico della batteria. Infatti gli elementi di nostro interesse che influiscono nel consumo della batteria sono il compressore del sistema A/C e la ventola del motore. Si deve dunque trovare il giusto compromesso tra consumo del compressore e il consumo della ventola. Può capitare infatti che nonostante il corretto funzionamento dell’ sistema AFM (evitare l’*icing*), l’ utilizzo eccessivo della ventola determini un consumo maggiore della batteria e dunque da un effetto negativo o, viceversa, può capitare che nonostante la ventola stia funzionando, il consumo del compressore sia maggiore, a causa della presenza della fase *icing*, determinando un consumo della batteria più rapida (in tal modo si potrebbe regolare la ventola in modo da ridurre il più possibile il consumo da parte del compressore).

Infine il generatore PWM serve per poter regolare la velocità della ventola e permette di controllarla a distanza evitando di farla funzionare alla massima

velocità (riducendo il suo consumo). Si potrebbe dunque ottenere un effetto positivo anche a velocità più basse ma la difficoltà è capire a quale percentuale di PWM bisogna far funzionare la ventola in base alle diverse



velocità del veicolo e dunque nei diversi carichi del motore.

Sono state compiute delle prove preliminari per lo studio del flusso in prossimità del condensatore (ciò verrà spiegato nel paragrafo 4.0.3 “scelta del PWM”).

FIGURA 60: Generatore di PWM.

4.0.2 CICLO WLTP

Il ciclo guida è uno strumento utilizzato per l’omologazione dei veicoli. Dopo la loro produzione infatti la normativa prevede che il veicolo non debba superare un certo valore di emissioni in termine di CO₂. Per la verifica di ciò, viene analizzata l’emissione di un veicolo che viene guidato seguendo un ciclo guida definito dalle direttive comunitarie. Il WLTP è il nuovo ciclo guida entrato in vigore l’1 settembre 2017 e ha sostituito il ciclo NEDC, messo in vigore dal 1997, perché considerato poco aggressivo in termini di accelerazioni e di stile di guida. È costituito da quattro parti e, comparato al vecchio ciclo NEDC, possiede una velocità massima e durata maggiore (le caratteristiche del ciclo sono riassunte nella tabella 4). Come si vede in figura 61, il ciclo è suddiviso in 4 parti: lento, medio, veloce e super veloce. Non tutti i veicoli sono omologati allo stesso tipo e ciò dipende dalle loro caratteristiche in termini di potenza e massa. Il parametro discriminante è il *PMR*, definito come il rapporto tra potenza nominale e la massa a vuoto del veicolo e, in base ad esso, il veicolo verrà omologato in modo differente. I veicoli infatti sono raggruppati in 3 classi:

- *classe 1* → il veicolo eseguirà solo il ciclo lento e medio per la sua omologazione;
- *classe 2* → il veicolo eseguirà solo il ciclo lento, medio e veloce per la sua omologazione;
- *classe 3* → eseguirà tutti e quattro cicli per la sua omologazione.

	s	s	m	km/h	m/s ²	m/s ²
	Tempo totale	Durata stop	Distanza	Velocita _{max}	Acc. min	Acc. max
Basso	589	156	3,09	56,5	-1,47	1,47
Medio	433	48	4,75	76,6	-1,49	1,57
Veloce	455	31	7,15	97,6	-1,49	1,58
Super veloce	323	7	8,25	131,3	-1,21	1,03
Totale	1800	242	23,26	-	-	-

TABELLA 4: Caratteristiche del ciclo WLTP.



FIGURA 61: ciclo guida WLTP usato per le seconde prove.

Nel caso in esame, la Renault Zoe è un veicolo full-electric e dunque la scelta del ciclo WLTP è stata del tutto arbitraria in quanto, come già detto, lo scopo di un ciclo guida è di testare l'emissione di un veicolo in termini di CO₂. La scelta del ciclo WLTP è dovuta quindi alla tipologia di percorso che permette di mettere maggiormente alla prova il sistema in esame e dare risultati più realistici. Le prove sono state compiute in galleria climatica grazie a un guidatore esperto che accelera e frena seguendo il ciclo grazie a un opportuno monitor fissato all'interno del veicolo.

4.0.3 SCELTA DEL PWM

La ventola nelle prove a velocità costante, ha lavorato al massimo delle sue prestazioni che equivale a 100% del PWM. Stavolta, essendo il possesso del generatore PWM, è importante capire, in base alle condizioni, quale sia il corretto valore da utilizzare. La scelta della percentuale di segnale PWM durante le prove in manuale, è stata ricavata per via sperimentale. Sono state compiute una serie di prove a velocità costante in cui è stato fatto variare gradualmente il PWM della ventola per individuare il valore ottimale. I valori di velocità analizzati sono stati 0 km/h, 40km/h, 60km/h e 80km/h e su ciascuna di esse è stato fatto variare il PWM dal 0% a 100% con prove di 5 minuti ciascuna. Le prove nascono dal fatto che a seconda della velocità del veicolo, il flusso di aria dal motore al condensatore può incidere più o meno negativamente. Ad esempio a 80 km/h è possibile che, a causa della velocità dell'aria esterna che entra nel cooling module, l'effetto del flusso di aria dal motore, se la ventola non è spinta al massimo, potrebbe non avere alcun effetto. Viceversa a 0 km/h (veicolo fermo), l'utilizzo della ventola al massimo potrebbe dare un buon effetto ma ciò richiederebbe un elevato consumo energetico e dunque un effetto negativo in termini energetici. In questo ultimo caso anziché sfruttare il massimo della ventola, per ottenere un effetto positivo, potrebbe essere necessario ad esempio solo un quarto della potenza di essa. Dunque è importante riuscire ad individuare il giusto compromesso per ottenere l'effetto voluto. La scelta del valore della percentuale di PWM della ventola deriva dall'analisi di alcuni parametri di riferimento come la temperatura del refrigerante in uscita dal condensatore esterno o l'andamento del numero di giri del compressore (figura 62). È inoltre interessante osservare anche l'andamento medio delle temperature in prossimità del condensatore e la temperatura registrata dalle termocoppie poste in prossimità del convogliatore (figura 63).

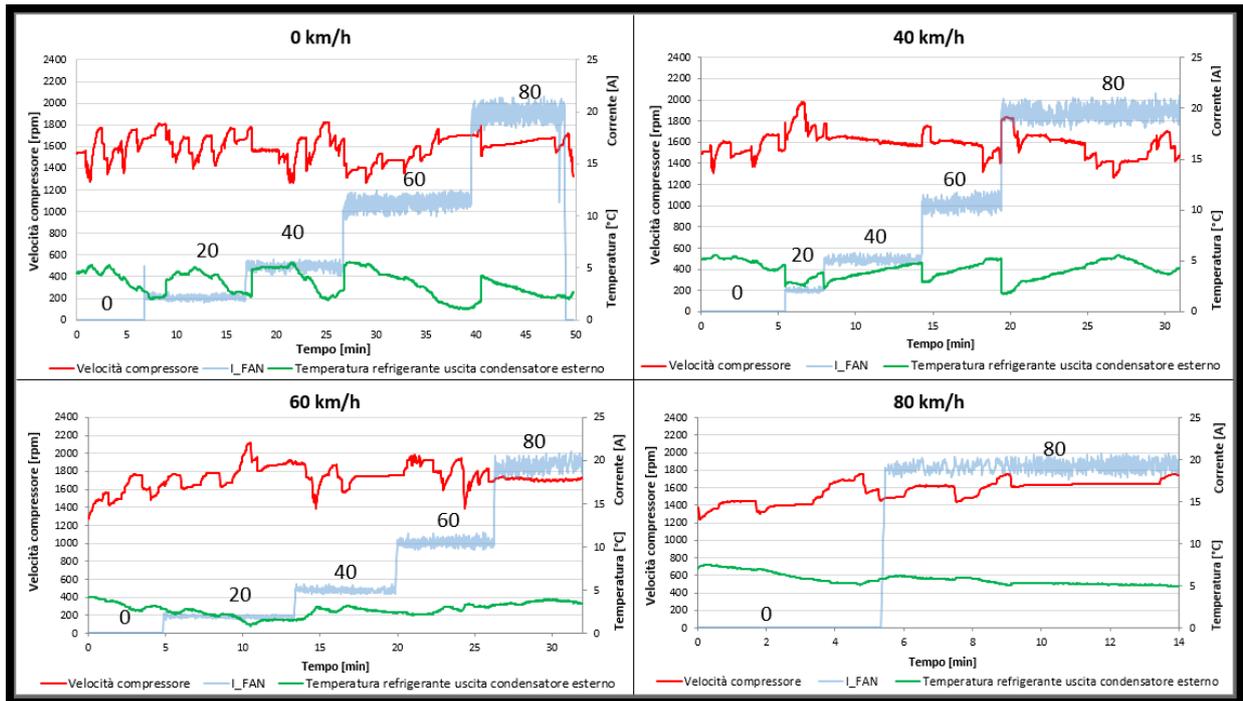


FIGURA 62: andamento della temperatura del refrigerante all'uscita del condensatore esterno e del numero di giri del compressore messe a confronto con la variazione del PWM per andare ad individuare il valore del PWM ideale per diverse velocità del veicolo.

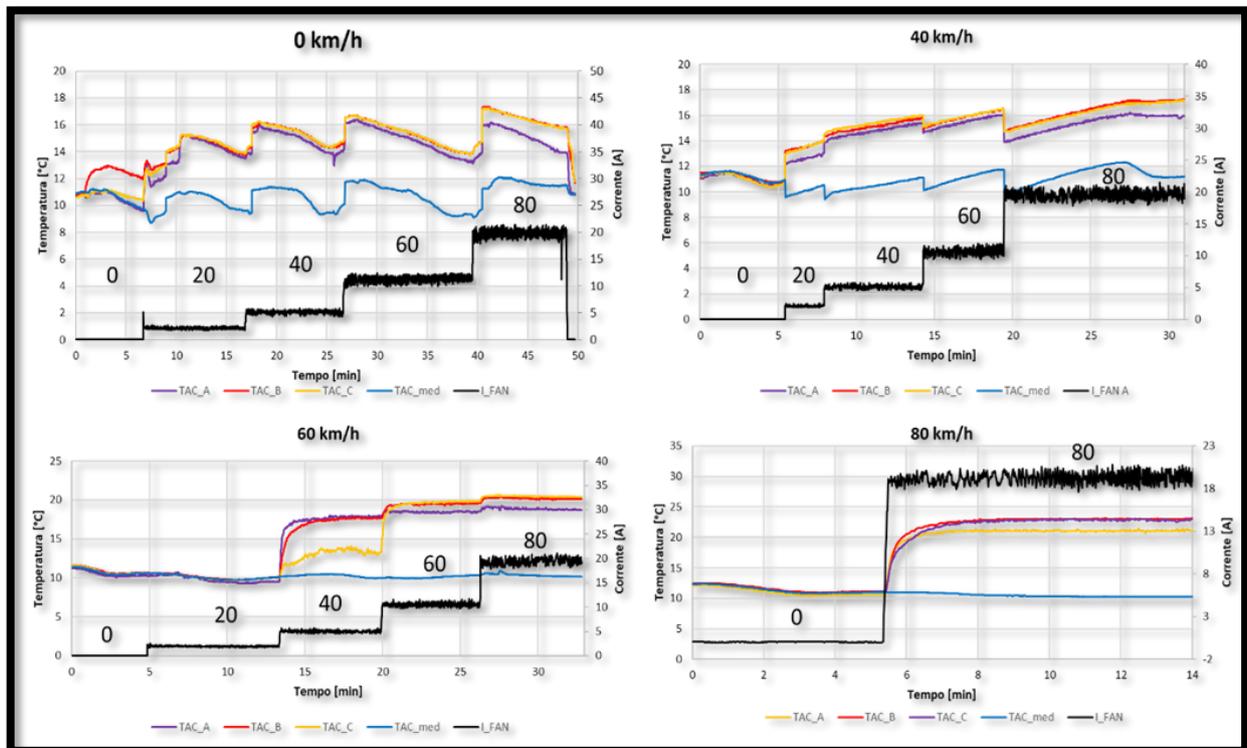


FIGURA 63: andamento delle temperature acquisite nelle varie prove attraverso le termocoppie poste su di esso.

In riferimento alle figure 62 e 63, si possono trarre le seguenti conclusioni:

- A 0 km/h il valore ottimale di PWM è 60 %; ciò è dovuto al fatto che a tale velocità del veicolo, per valori di PWM pari a 60% o 80%, sia il consumo del compressore che le temperature percepite sul condensatore risultano essere massime. La scelta di PWM pari 60% è solo una scelta energetica in quanto, avendo quasi lo stesso effetto, è preferibile tale scelta.
- A 40 km/h il valore ottimale di PWM è 60%; anche in questo caso, come il caso a 0 km/h, per motivi energetici si preferisce tale valore.
- Da valori di velocità superiore a 40 km/h, si è preferito impostare un valore di PWM pari a 80%: a causa dell'effetto della pressione dinamica del flusso di aria esterno in prossimità del condensatore (vedi figura 59), il flusso di aria dal motore incontra maggiore difficoltà nel raggiungere la superficie del condensatore e come si è visto nella formula 8, tale effetto aumenta con il quadrato della velocità. Dunque occorre che la ventola, all'aumentare della velocità del veicolo, mandi una maggiore portata.

La conferma di quello che è stato appena affermato si ottiene dal TAC_{med} rappresentato in figura 63 dove, a 60 km/h e 80 km/h, la temperatura media percepita dalle termocoppie poste sulla superficie del condensatore si inizia a stabilizzare lungo un fissato valore e ciò dipende dal fatto che l'effetto dell'aria dal convogliatore va via via a ridursi. Di contro però si osserva come la temperatura percepita dalle termocoppie poste in prossimità del convogliatore (TAC_A , TAC_B e TAC_C vedi paragrafo 4.1 “preparazione seconde prove”) aumenta man mano che aumenta la velocità del veicolo e dunque all'aumento del carico del motore. Dunque nonostante l'effetto del flusso dell'aria dal motore si riduce, l'aumento della temperatura in tale zona determina un effetto positivo, andando ad influenzare l'aria circostante.

In genere il ciclo guida WLTP è costituito da una velocità variabile nel tempo e dunque diverse accelerazioni e decelerazioni. Per la scelta del PWM, il ciclo è stato suddiviso per velocità medie come in figura 64 e in base a queste è stato assegnato il valore di 60% e 80%. Da ciò esce fuori l'andamento come in figura 65.

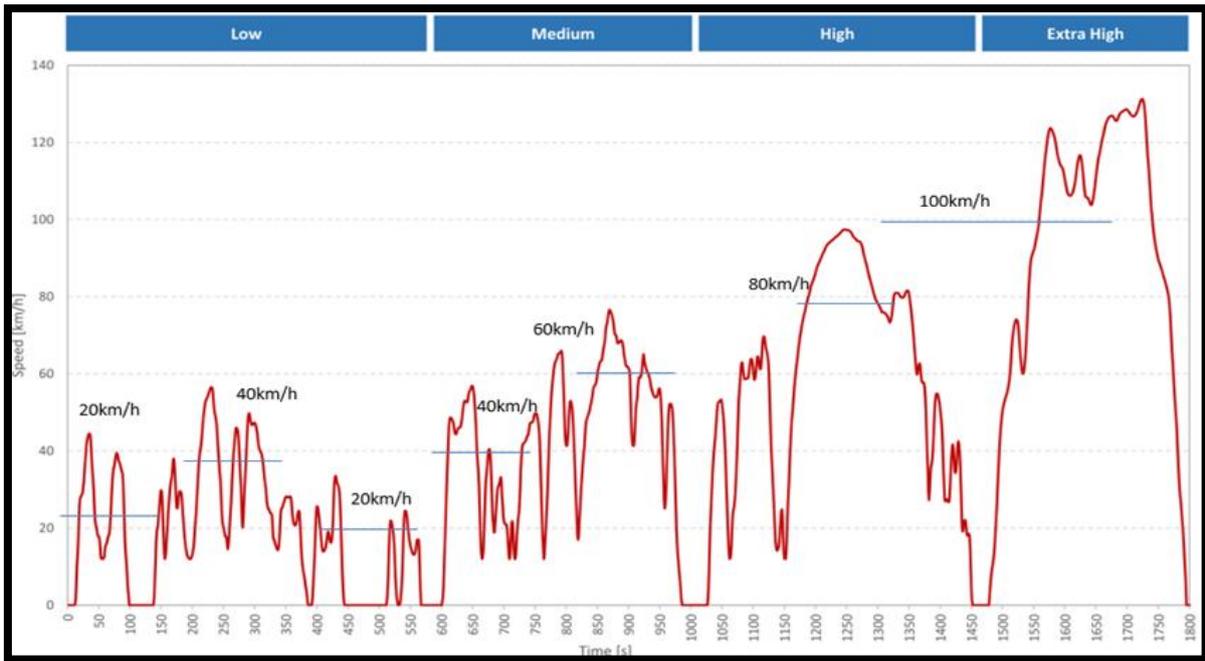


FIGURA 64: Per la scelta del PWM nei vari punti del ciclo, le varie zone sono state divise in base a una velocità media.

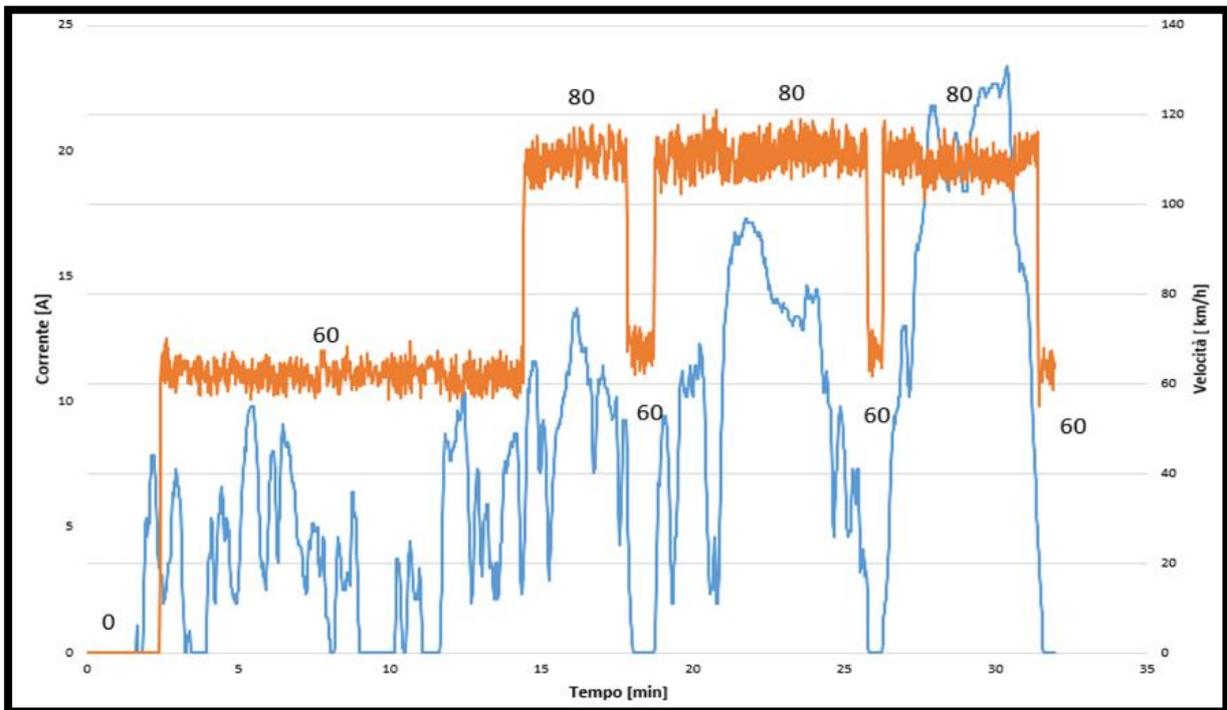


FIGURA 65: Andamento del PWM al variare della velocità del ciclo.

Nella prima fase in cui la velocità media si mantiene più bassa di 50km/h è stata scelta un PWM di 60% mentre nella seconda zona del ciclo, in cui la velocità media inizia ad essere consistente, è stato impostato un PWM pari ad 80%. Sempre in riferimento alla figura 60%, nelle ultime fasi sono presenti tre zone a velocità nulla in cui il veicolo si mantiene fermo e in esse il PWM è stato impostato pari a 60%. Nella fase iniziale invece, per un tempo di circa 2 minuti, la ventola non viene attivata in modo da velocizzare la fase di *warm up del motore*. Ciò è fatto allo scopo di aumentare l'effetto del flusso di aria che nella fase iniziale possiederà una temperatura bassa (il motore a carichi bassi scalda di meno).

Infine vi sono due osservazioni interessanti da tenere in considerazione: la prima è che si è considerato il valore di PWM pari a 80% come il massimo perché sperimentalmente si è notato che tra 80% e 100% non vi è molta differenza; secondariamente è importante ricordare che la ventola del motore non verrà mai azionata con questa frequenza dal sistema di controllo del veicolo e dunque si è abusato del suo utilizzo proprio per verificare la massima prestazione del sistema AFM.

4.1 PREPARAZIONE DELLE PROVE CON CICLO GUIDA

Il posizionamento dei sensori non è molto diverso rispetto alle prime prove e le uniche differenze sono dovute all'aggiunta delle termocoppie poste sulla carcassa del motore, in modo da reperire le temperature di esso, e al cambio di posizione e del numero degli anemometri che sono stavolta disposti lungo la superficie del radiatore e dietro il condensatore in modo da analizzare la velocità dell'aria in diversi punti nel cooling module (vedi figura 66).

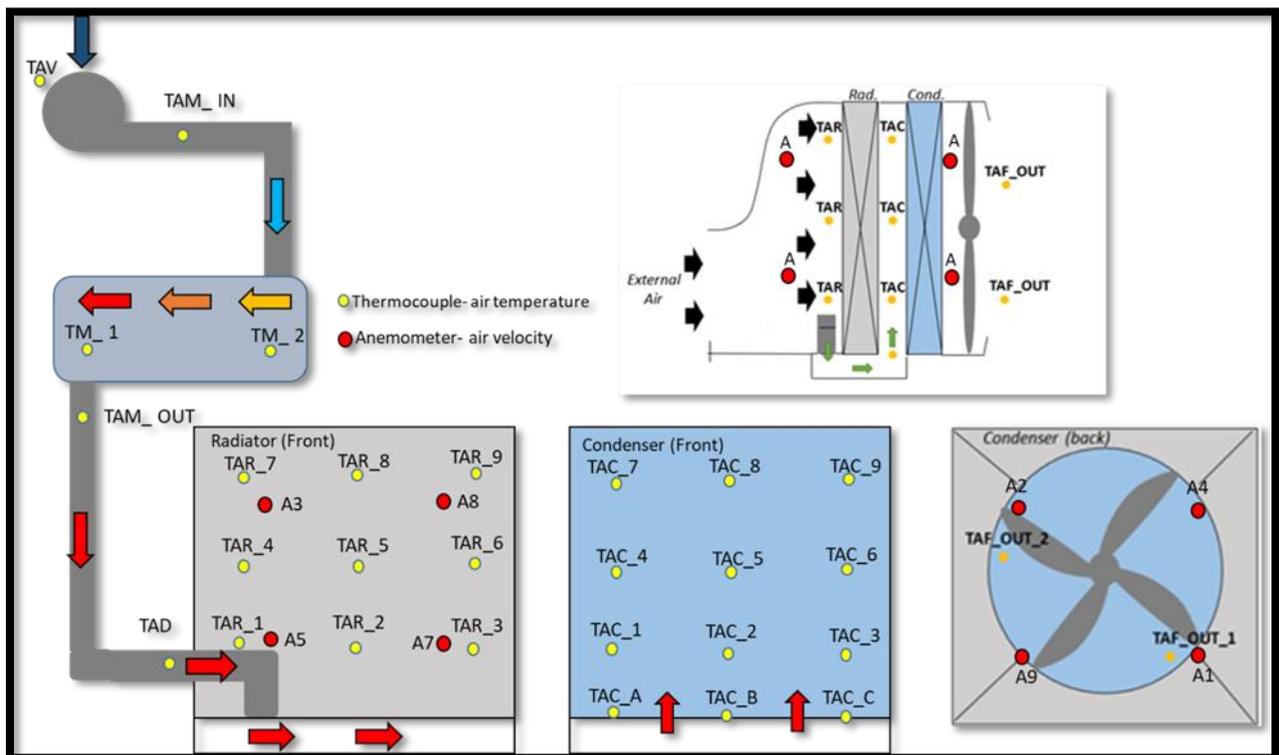


FIGURA 66: configurazione delle sonde nei vari punti del sistema pe la seconda prova.

Come per le prime prove, anche in questo caso, oltre alle termocoppie ed anemometri appena mostrati, per reperire informazioni sulla temperatura e la pressione in uscita dal condensatore esterno del refrigerante, è stata montata una termocoppia e un trasduttore di pressione in uscita di esso. Inoltre per reperire informazioni sul veicolo e sul sistema pompa di calore, come numero di giri, temperatura di target e comando del de-icing, i dati sono stati acquisiti direttamente dalla centralina attraverso il sistema di acquisizione *DDT2000*. Nella tabella 5 è mostrato l'elenco degli strumenti usati durante le prove con ciclo guida per reperire i dati per l'analisi.

Numero	Nome sensore	Posizione	Tipo di misura	Tipo di sensore	Numero	Nome sensore	Posizione	Tipo di misura	Tipo di sensore
1	TAV	Ingresso ventola motore	Temperatura	Termocoppia	17	TAC_1	Superficie condensatore	Temperatura	Termocoppia
2	TAM_IN	Ingresso motore	Temperatura	Termocoppia	18	TAC_2	Superficie condensatore	Temperatura	Termocoppia
3	TAM_OUT	Uscita motore	Temperatura	Termocoppia	19	TAC_3	Superficie condensatore	Temperatura	Termocoppia
4	TAD	Ingresso convogliatore	Temperatura	Termocoppia	20	TAC_4	Superficie condensatore	Temperatura	Termocoppia
5	TAR_1	Superficie radiatore	Temperatura	Termocoppia	21	TAC_5	Superficie condensatore	Temperatura	Termocoppia
6	TAR_2	Superficie radiatore	Temperatura	Termocoppia	22	TAC_6	Superficie condensatore	Temperatura	Termocoppia
7	TAR_3	Superficie radiatore	Temperatura	Termocoppia	23	TAC_7	Superficie condensatore	Temperatura	Termocoppia
8	TAR_4	Superficie radiatore	Temperatura	Termocoppia	24	TAC_8	Superficie condensatore	Temperatura	Termocoppia
9	TAR_5	Superficie radiatore	Temperatura	Termocoppia	25	TAC_9	Superficie condensatore	Temperatura	Termocoppia
10	TAR_6	Superficie radiatore	Temperatura	Termocoppia	26	TAF_OUT_1	Uscita ventola cooling module	Temperatura	Termocoppia
11	TAR_7	Superficie radiatore	Temperatura	Termocoppia	27	TAF_OUT_2	Uscita ventola cooling module	Temperatura	Termocoppia
12	TAR_8	Superficie radiatore	Temperatura	Termocoppia	28	A3	Ingresso radiatore	Velocità	Anemometro
13	TAR_9	Superficie radiatore	Temperatura	Termocoppia	29	A8	Ingresso radiatore	Velocità	Anemometro
14	TAC_A	Uscita convogliatore	Temperatura	Termocoppia	30	A5	Ingresso radiatore	Velocità	Anemometro
15	TAC_B	Uscita convogliatore	Temperatura	Termocoppia	31	A7	Ingresso radiatore	Velocità	Anemometro
16	TAC_C	Uscita convogliatore	Temperatura	Termocoppia	32	A2	Uscita condensatore	Velocità	Anemometro
17	TRC_OUT	Uscita condensatore	Temperatura	Termocoppia	33	A4	Uscita condensatore	Velocità	Anemometro
18	PRC_OUT	Uscita condensatore	Pressione	Trasduttore	34	A9	Uscita condensatore	Velocità	Anemometro
19	RH	Ingresso cooling module	Umidità	Sensore umidità	35	A1	Uscita condensatore	Velocità	Anemometro
20	IV	In prossimità ventola motore	Corrente	Shunt	36	TM_1	Carcassa motore lato sinistro	Temperatura	Termocoppia
21	TEM_INT	Uscita condensatore interno	Temperatura	Termocoppia	37	TM_2	Carcassa motore lato destro	Temperatura	Termocoppia

TABELLA 5: elenco strumenti di misura utilizzati per le prove con ciclo guida.

4.1.1 DESCRIZIONE DELLE PROVE CON CICLO GUIDA E CONDIZIONI DI PROVA

Le prove con ciclo guida possono essere definite come la fase successiva alle prove descritte nel capitolo 3. In esse, si cerca di individuare un eventuale risparmio energetico grazie alla presenza del sistema AFM. Da tale aspetto deriva un'analisi del consumo del compressore che è il maggior responsabile del consumo della batteria quando si verifica la formazione di ghiaccio sul condensatore esterno. Infine occorre comprendere quali sono gli effetti del sistema AFM sul funzionamento in aria condizionata durante i periodi più caldi.

Sono state compiute 4 prove: le prime due sono servite per testare il funzionamento del sistema AFM sul ciclo WLTP mentre le ultime due sono servite per capire cosa accade al veicolo nel funzionamento in A/C. È stato dunque compiuto, come nelle prime prove, un confronto tra il veicolo senza modifiche (normale produzione) e il veicolo con il sistema in esame. Le condizioni di prova sono riassunte nella tabella 6.

Numero prove	Tipologia prova	[°C]	[-]	[N]	[decaN/km/h²]	[kg]	[min]	[-]
		Temperatura esterna	Umidità aria	K ₀	K ₂	Peso veicolo	Durata prova	Regolazione clima
1	H/P AFM	5	95%	74,95	0,0036	1350	30	Max hot
2	H/P N.P.							
3	A/C AFM	35	50%					22°C auto
4	A/C N.P.							

TABELLA 6: Condizioni di prova nelle 4 prove.

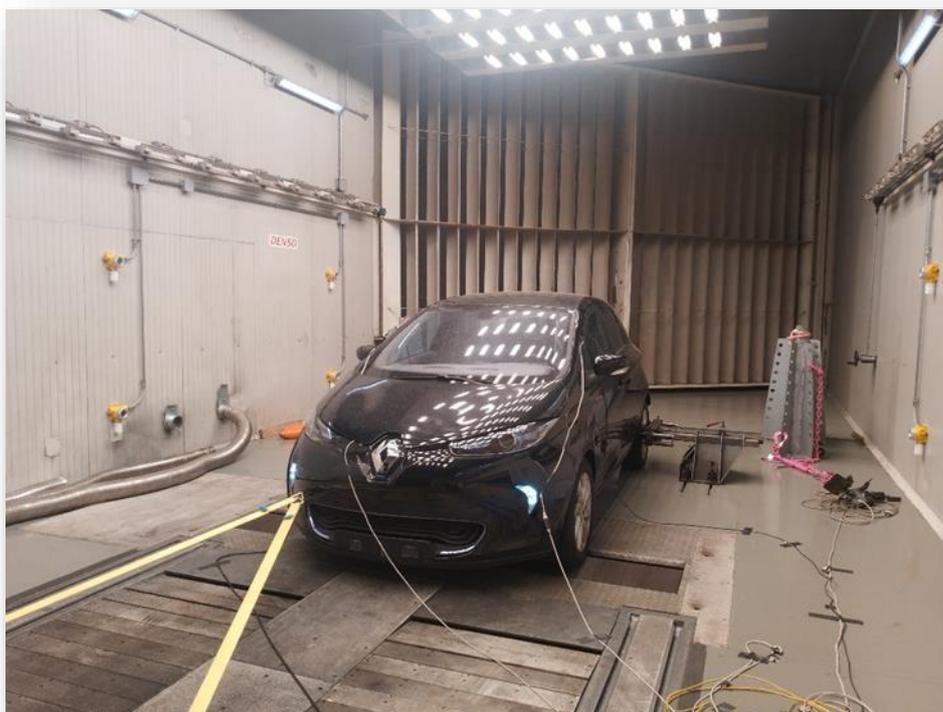


FIGURA 67: veicolo posizionato in galleria climatica durante le prove.

4.2 RISULTATI DELLE PROVE IN POMPA DI CALORE

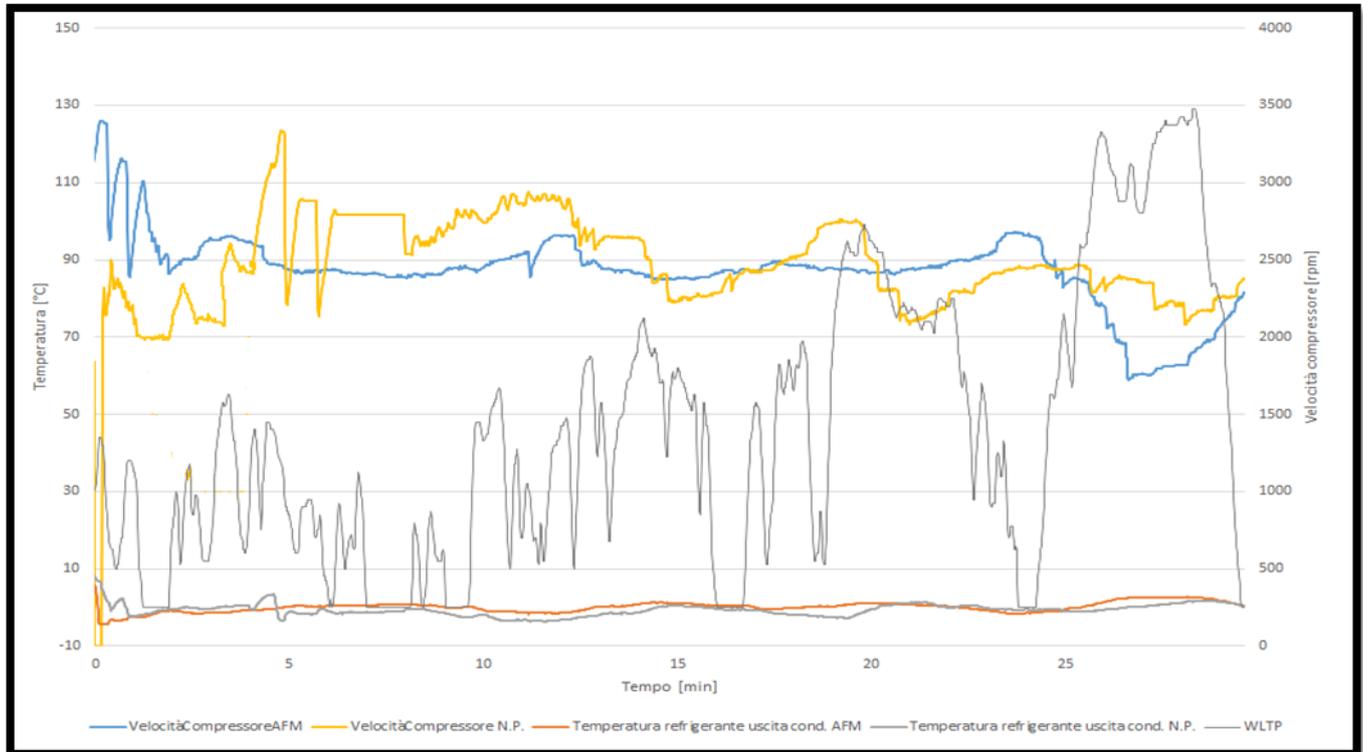


FIGURA 68: confronto tra velocità del compressore e temperatura del refrigerante all'uscita del condensatore esterno.

Come primo risultato è interessante confrontare la velocità del compressore e la temperatura del refrigerante in uscita dal condensatore esterno tra le prime due prove: NP e AFM. In riferimento alla figura 68 si può osservare come la temperatura del refrigerante nella prova con il sistema AFM si è mantenuta più alta rispetto alla temperatura registrata nel veicolo senza modifiche. Ciò è segno del fatto che il calore fornito dal flusso di aria dal motore ha avuto un effetto positivo. Sempre in riferimento alla figura 68, ulteriore risultato interessante è il numero di giri del compressore che risulta essere più stabile e nella fase finale più basso nel caso in cui nel veicolo è presente il sistema AFM. Un ragionamento del tutto analogo può essere fatto andando a considerare le pressioni. In riferimento alla figura 69 l'alta pressione assume un valore più stabile e più basso nel caso in cui nel veicolo è presente il sistema AFM. Infine, in riferimento alla figura 70, è interessante notare il livello di carica nelle due prove e si nota subito che il veicolo con il sistema in esame ha una percentuale di carica finale più alta. Dunque a partire da livelli di carica pressoché uguali, alla fine del ciclo, presenta una carica

più bassa il veicolo senza modifiche e il guadagno energetico che si ottiene è di circa 20%.

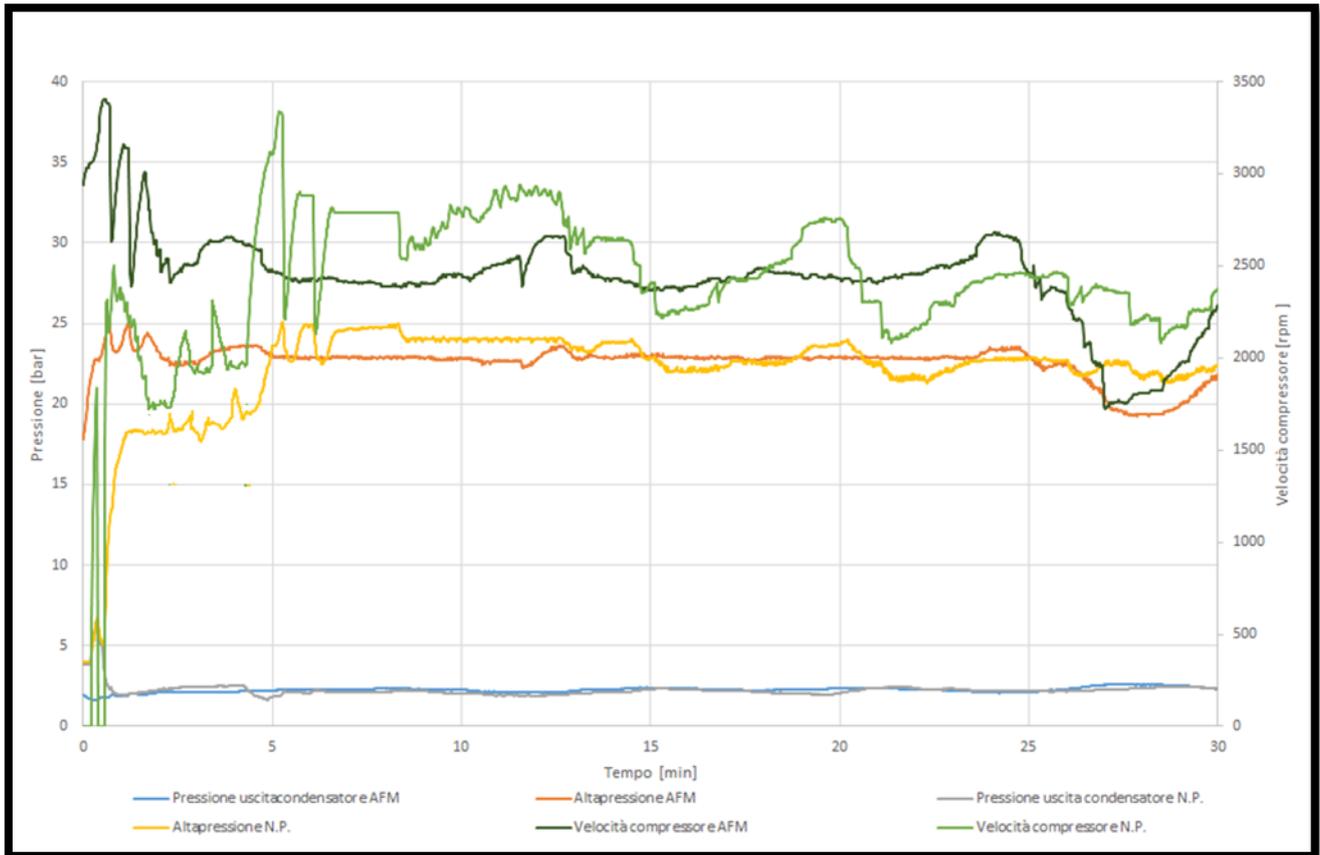


FIGURA 69: confronto tra alta e bassa pressione con il numero di giri del compressore per le prime due prove.

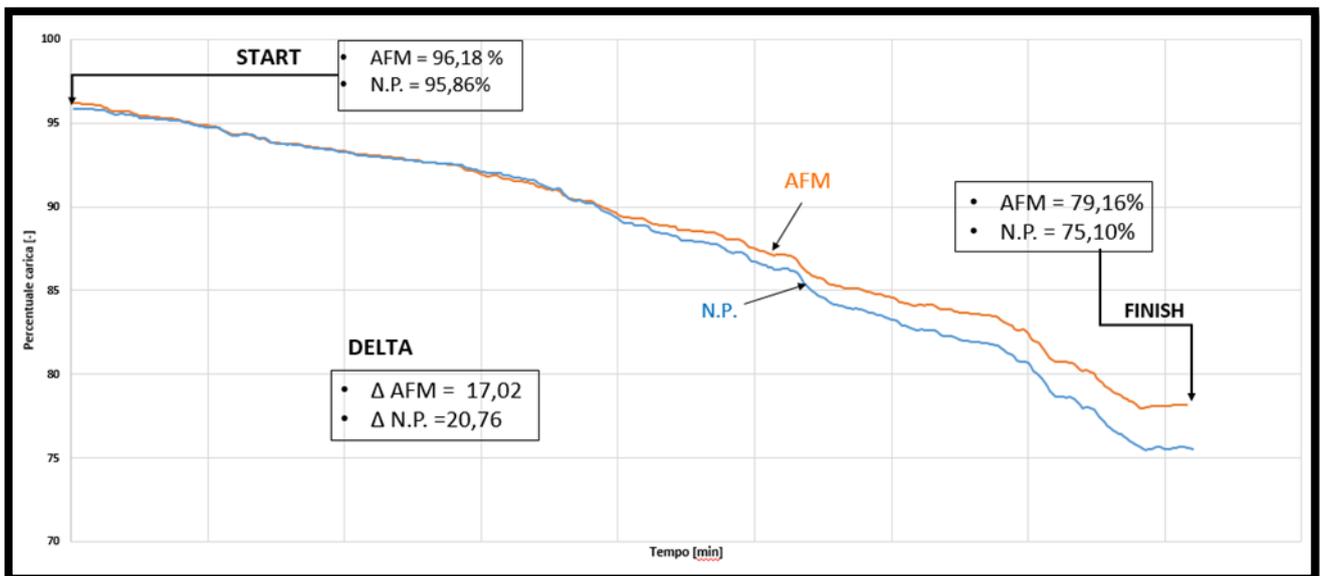


FIGURA 70: Livello di carica della batteria in funzione del tempo durante il ciclo.

Dalla figura 70 si può intuire come, se la prova avesse avuto una durata maggiore, tale da portare alla scarica completa della batteria, si sarebbe ottenuto un guadagno energetico più evidente. Infine in figura 71 è mostrato l'andamento delle temperature in prossimità del condensatore durante il ciclo. È evidente come nelle prove con il veicolo senza modifiche (curva verde) la temperatura media nel condensatore è più bassa del caso in cui è presente il sistema AFM (curve blu). Inoltre in questo ultimo caso le termocoppie poste alla base del condensatore (vedi paragrafo 4.1" preparazione seconde prove") acquisiscono valori di temperatura alte superando in alcuni punti anche i 15 °C (si ricorda che tali valori di temperatura non sono presenti nel veicolo senza modifiche in quanto non arriva ancora calda dal motore dunque la loro temperatura si mantiene intorno ai 6 gradi).

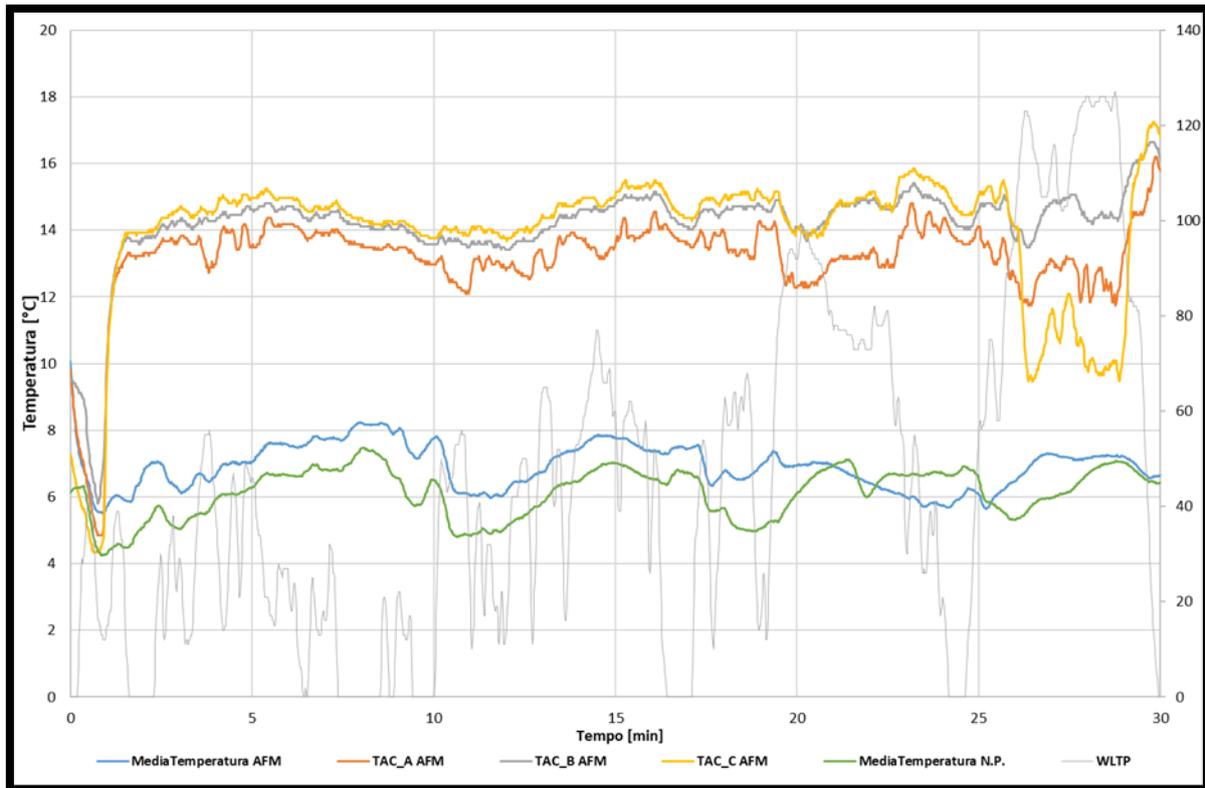


FIGURA 71: andamento delle temperature in prossimità del condensatore nelle due modalità di prova.

4.2.1 OSSERVAZIONE SUI RISULTATI

I risultati ottenuti nelle due prove in pompa di calore sono soddisfacenti: la richiesta del risparmio energetico è stata soddisfatta, riuscendo ad ottenere con il sistema AFM un risparmio di energia della batteria di circa il 20% rispetto al sistema senza modifiche (vedi figura 70). La temperatura del refrigerante all'uscita del condensatore esterno risulta essere più stabile e più alta lungo il ciclo e questo è dovuto alle maggiori temperature raggiunte in prossimità di esso (vedi figura 68, curve arancione). In generale però la prova è stata troppo breve per poter individuare la presenza della fase *icing* e dunque non è possibile dire con certezza se tale fase si sarebbe presentata in entrambe le prove. Per avere maggiori chiarezze su questo aspetto sarebbe necessario prolungare il tempo delle prove magari andando a ripetere più volte il ciclo. Inoltre l'effetto del flusso di aria proveniente dal motore potrebbe essere migliorato andando a ottimizzare il sistema, riducendo le perdite e le cadute di pressione. In generale però i risultati ottenuti risultano essere positivi e la presenza del sistema AFM consente un funzionamento migliore della pompa di calore, aumentando la sua efficienza.

4.3 RISULTATI DELLA PROVA IN ARIA CONDIZIONATA

Le prove in aria condizionata hanno lo scopo di verificare il funzionamento del sistema A/C del veicolo nel caso in cui è presente il sistema di air flow management. Se infatti nel veicolo è presente quest'ultimo è importante capire cosa accade nell'utilizzo in climi più caldi, quando l'utente attiva l'aria condizionata in abitacolo. Per verificare tale aspetto, anche in questo caso è stato paragonato il veicolo NP e il veicolo in cui il sistema AFM è invece presente (stavolta non è stato utilizzato il generatore PWM ma il sistema di controllo del veicolo stesso perché lo scopo della prova è verificare l'effetto di questo con la presenza del sistema AFM). In riferimento alla figura 3 del paragrafo 1.2 "sistema A/C per un'automobile", quando l'utente attiva l'aria condizionata, la valvola a tre vie viene azionata in modo da far passare il refrigerante nell'evaporatore all'interno del HVAC e lo sportellino viene chiuso in modo da evitare il passaggio dell'aria attraverso il condensatore interno. Al di fuori di ciò, la struttura del sistema rimane la stessa e la differenza tra il funzionamento in pompa di calore e in aria condizionata sta nel fatto che si inverte il ciclo. Nel complesso dunque in tali prove si cerca di individuare l'effetto che il sistema di air flow

management ha sul sistema A/C in termini energetici e si ricerca un eventuale effetto negativo sull'efficienza di quest'ultimo.

4.3.1 ASPETTO ENERGETICO

L'aspetto energetico è la chiave delle ultime due prove perché si teme che la presenza del sistema di air flow management possa ridurre l'efficienza del sistema A/C. Si potrebbe infatti pensare che, attivandosi la ventola del motore durante i periodi estivi in cui la temperatura esterna è alta, tale flusso di aria vada ad incidere negativamente nel funzionamento del condensatore esterno che riceve ulteriore calore. Nella realtà, come è possibile vedere in figura 72, accade l'opposto: il veicolo, con la presenza del sistema AFM, consuma meno energia rispetto al veicolo in NP.

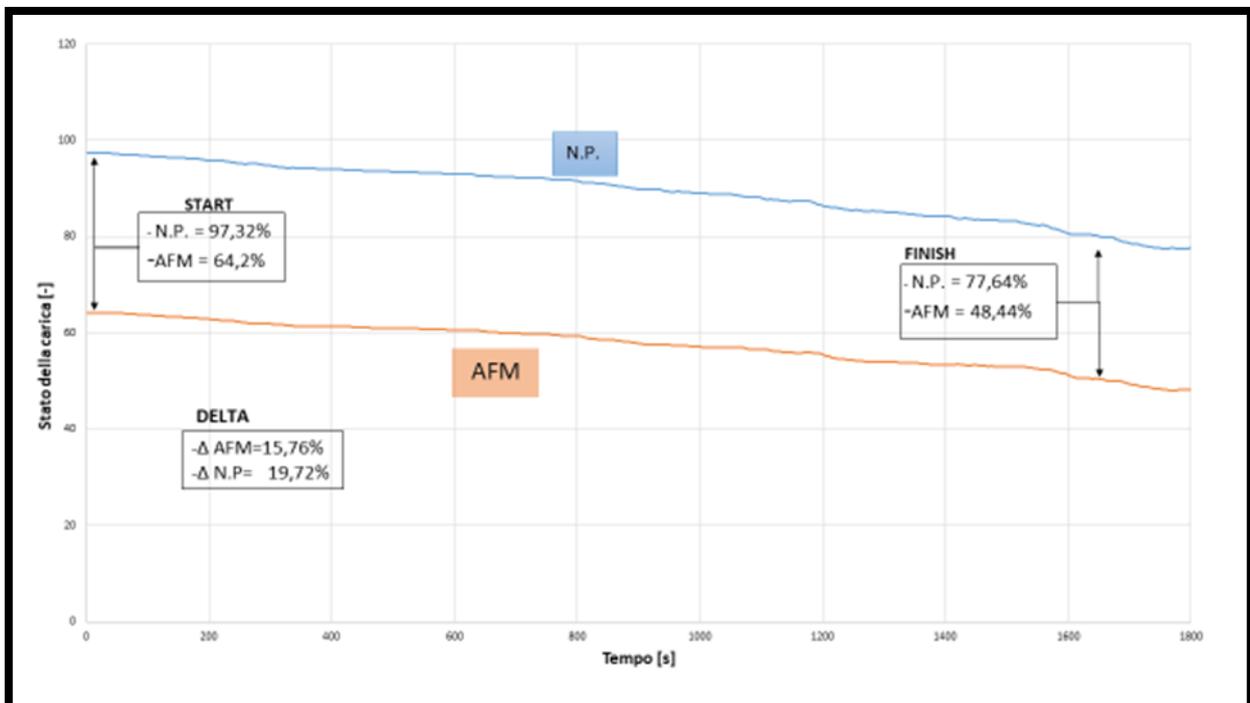


FIGURA 72: confronto del livello di carica tra le due modalità di prova.

Dalla figura 72, è inoltre possibile notare che con il sistema AFM si ottiene un risparmio energetico di circa il 20% rispetto al veicolo NP; per comprendere tale risultato è necessario analizzare i dati acquisiti in prova.

Un aspetto importante da tenere in considerazione è la modalità di scarica della batteria: osservando la figura 72 si può facilmente notare che le due prove sono partite a livelli di carica differenti a causa problemi verificatosi nel corso di svolgimento. Da ciò si potrebbe pensare che i valori ottenuti non sono veritieri in quanto non è possibile mettere a confronto i due andamenti (il modo in cui si scarica la batteria non è lineare dunque, ad esempio,

quest'ultima si scarica in modo diverso nel passaggio dal 100% a 80% rispetto al passaggio dal 60% al 40%). Per poter ovviare a questo problema, attraverso i dati acquisiti dalla centralina ed estratti tramite il programma di acquisizione *DDT2000*, si è riusciti ad individuare la quantità di energia complessiva consumata in entrambe le prove. La figura 73 dà la conferma di ciò che è stato detto, ovvero nella prova in cui è presente il sistema AFM la batteria consuma meno energia rispetto al caso NP e in particolare questa risulta essere circa il 17% più bassa rispetto al consumo di energia del veicolo senza sistema AFM.

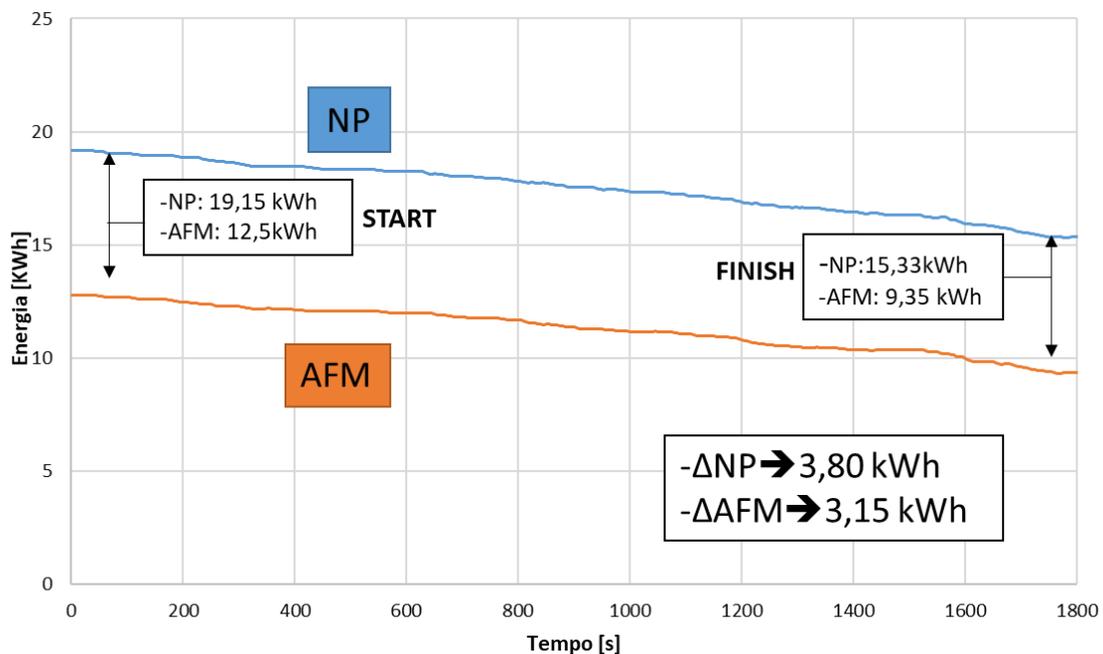


FIGURA 73: andamento dell'energia consumata nelle due prove.

Occorre dunque capire a cosa è stato dovuto questo risparmio energetico tra le due prove andando ad analizzare alcuni parametri importanti. Partendo dal comportamento del compressore durante il ciclo, la figura 74 mostra come la differenza del consumo del compressore tra le due prove risulta essere pressoché lo stesso e con esso anche l'andamento delle alte pressioni. Da ciò si intuisce che la differenza del consumo energetico tra le due prove, evidenziato in figura 73, non è dovuto al compressore.

Si potrebbe dunque ipotizzare che il consumo energetico maggiore, nella prova in cui non è presente il sistema AFM, può essere dovuto ad un maggiore consumo da parte dell'elettronica del veicolo, raffreddata attraverso il radiatore ad acqua. La figura 75 mostra il delta di temperatura dell'aria che passa attraverso il radiatore acquisite dalle termocoppie poste sulla superficie del condensatore e del radiatore. In generale, maggiore è il

delta di temperatura dell'aria tra ingresso ed uscita del radiatore e maggiore sarà la temperatura dell'acqua che passa attraverso di esso e dunque maggiore sarà il lavoro svolto dall'elettronica del veicolo (inverter, convertitore DC/DC).

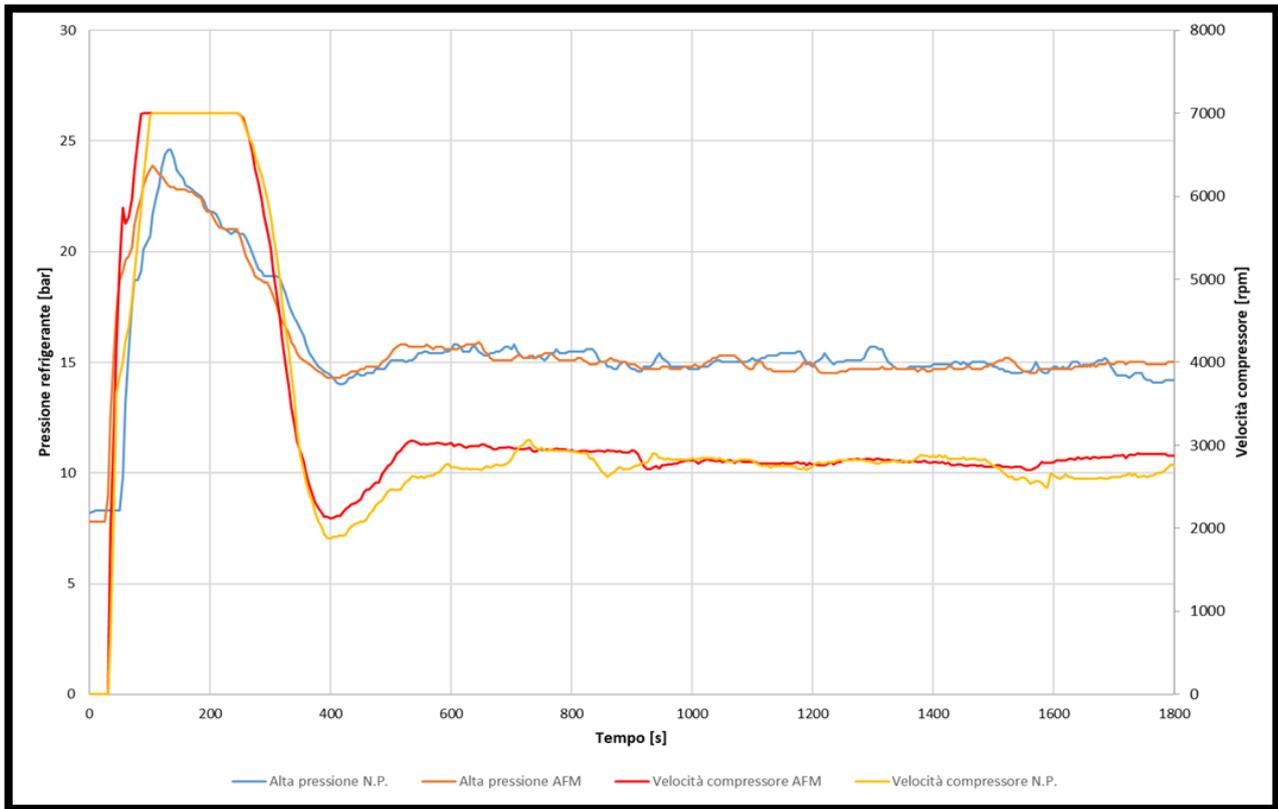


FIGURA 74: confronto tra il numero di giri e le pressioni del refrigerante per le due prove.

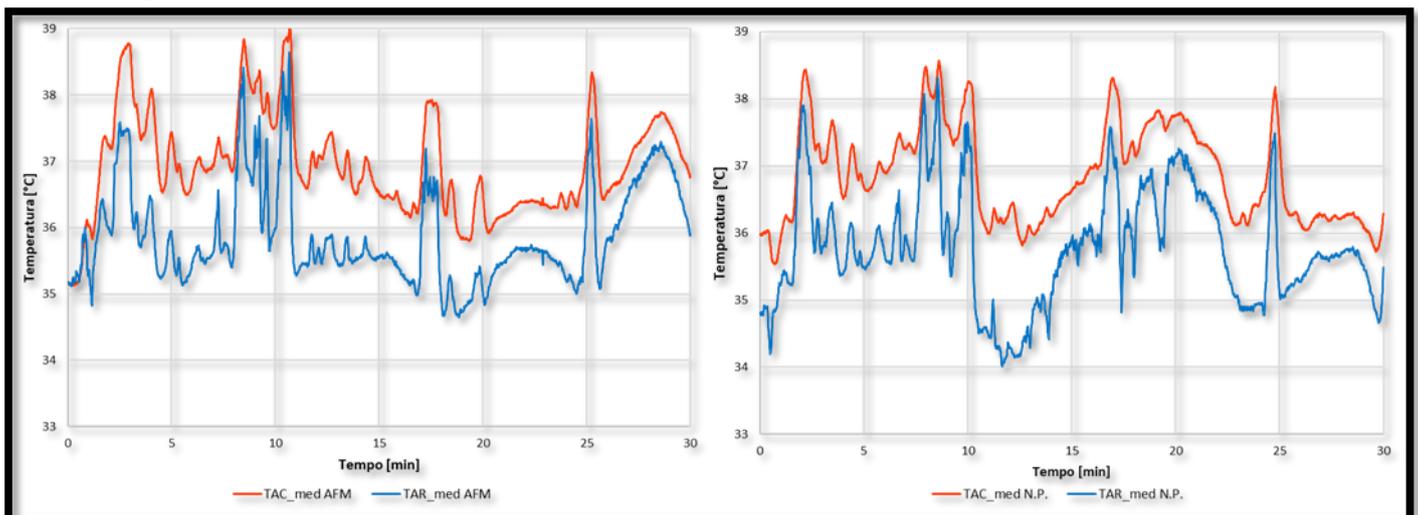


FIGURA 75: Confronto tra la media delle temperature in ingresso del radiatore e quella in ingresso del condensatore esterno. La figura di sinistra si riferisce al veicolo in cui è presente il sistema di AFM mentre a destra si riferisce al veicolo senza modifiche.

Osservando il grafico sinistro e destro in figura 75 diventa evidente che l'ipotesi appena fatta non può essere veritiera in quanto tra le due prove non vi sono molte differenze importanti: non è possibile affermare con certezza che l'elettronica abbia lavorato di più in NP piuttosto che in AFM. A questo punto l'unica spiegazione plausibile per spiegare tale aspetto energetico è la ventola raffreddamento motore. In riferimento alla figura 76, si nota come, mentre nel caso in cui nel veicolo è presente il sistema AFM il valore di corrente acquisita dallo shunt è nullo, nella prova in cui il veicolo non ha subito modifiche si hanno valori di assorbimento con un picco oltre i 2,5A, segno che in questo caso la ventola motore si è attivata. In particolare essa ha iniziato a funzionare dopo circa 27 minuti fino alla fine del ciclo, durante la fase del ciclo WLTP in cui vengono raggiunte velocità maggiori e dunque carichi maggiori da parte del motore. Dunque la domanda che sorge spontaneo è: come è possibile che con la presenza del sistema AFM nel veicolo la ventola del motore non viene attivata? La risposta si ottiene considerando la figura 77 dove è mostrato l'andamento delle temperature del motore.

Si noti come, mentre nel caso NP la temperatura in uscita dal motore aumenta gradualmente nel tempo, segno che il flusso di calore si sposta dal motore verso l'uscita (figura 77.B grafico a destra), nel caso in cui il sistema AFM è presente l'andamento delle temperature è variabile. Tale aspetto è già stato spiegato nel paragrafo 3.1.3 "andamento temperature del motore" ed è dovuto all'effetto della pressione dinamica dell'aria in prossimità del condensatore che fa sì che, quando la ventola del motore non si aziona, l'aria tende ad entrare nel sistema AFM e lo percorre in senso opposto; tale fenomeno, come si è visto, aumenta con il quadrato della velocità e si verifica nelle zone del ciclo in cui le velocità sono più elevate (vedi figura 77.A grafico a sinistra). Tale flusso di aria permette di raffreddare il motore automaticamente evitando l'attivazione della ventola motore. Si ha evidenza del fenomeno appena esposto, grazie alla lettura delle 3 termocoppie montate sul circuito di raffreddamento del motore: TAV_IN, TAM_IN e TAM_OUT (vedi paragrafo 4.1 "Preparazione delle prove con ciclo guida").

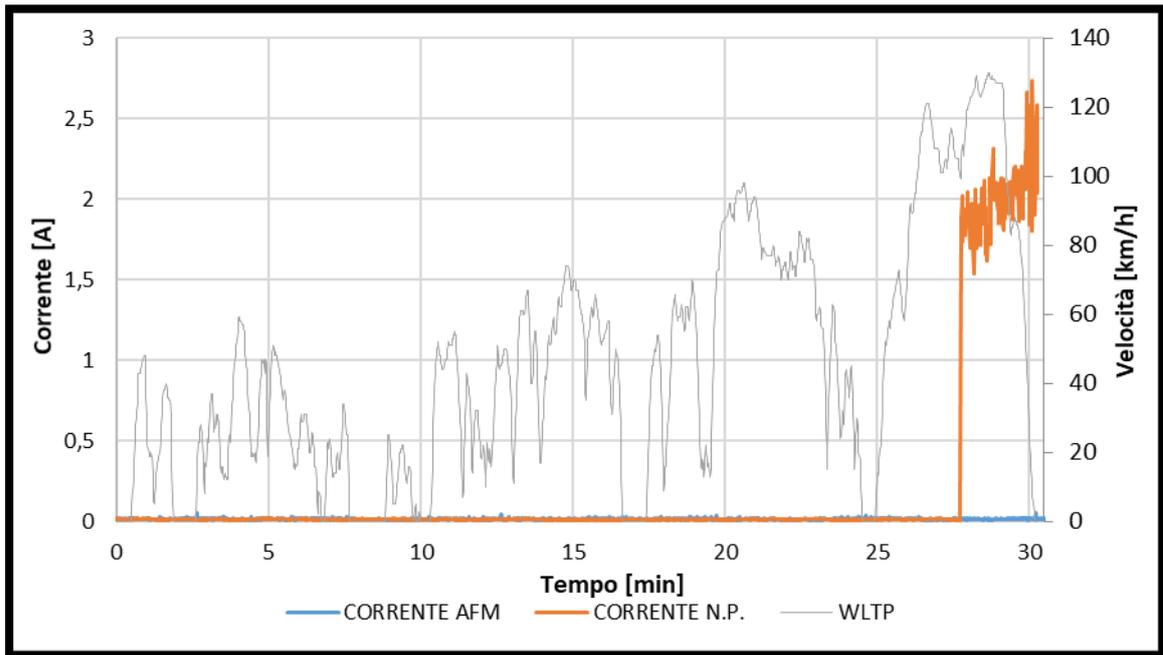


FIGURA 76: confronto tra i valori di corrente acquisiti attraverso lo shunt nelle due prove.

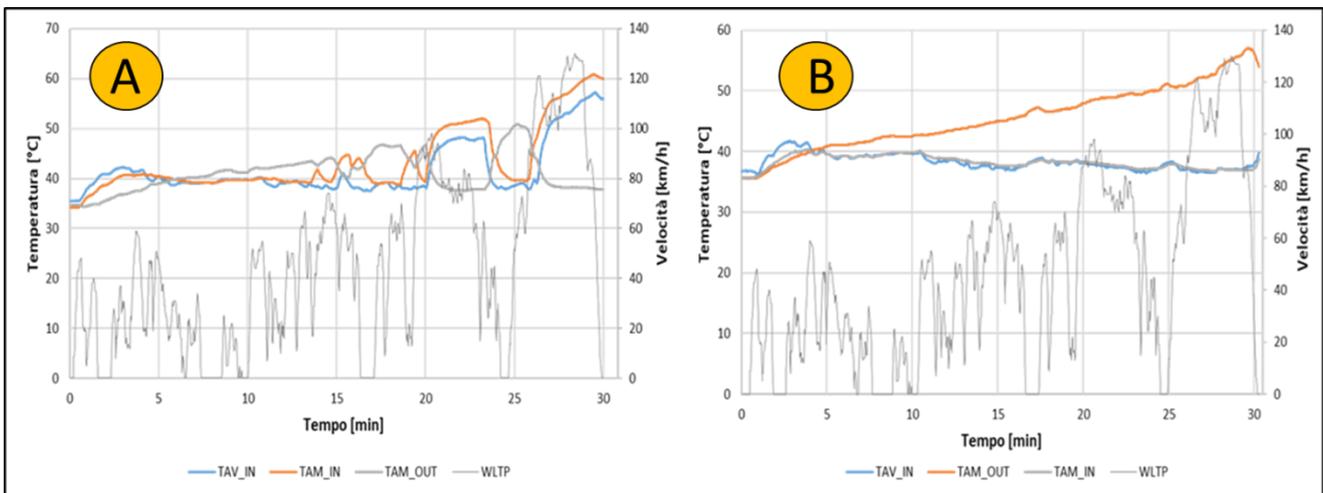


FIGURA 77: andamento delle temperature acquisite in ingresso della ventola, in ingresso motore ed in uscita motore. A. Andamento delle temperature in prossimità del motore nel caso in cui è presente il sistema AFM. B. Andamento delle temperature in prossimità del motore nel caso NP.

4.4 OSSERVAZIONI FINALI DELLE PROVE IN ARIA CONDIZIONATA

La presenza del sistema AFM ha dato, anche per questa tipologia di prova, un risultato positivo in quanto la sua presenza evita l'attivazione della ventola motore e dunque senza l'utilizzo di quest'ultima si riesce a raffreddare il motore, creando un effetto indiretto. Anche in questo caso però, per avere maggiore chiarezza sui risultati e per evidenziare più aspetti sugli effetti del sistema AFM sul sistema A/C, occorre compiere ulteriori verifiche di durata superiore (anche in questo caso si potrebbe pensare di compiere cicli WLTP consecutivi) per verificare ad esempio la presenza di un risparmio energetico più marcato oppure di contro mettere in crisi il sistema. È possibile infatti che, nel caso in cui venissero compiuti ulteriori cicli WLTP, il riscaldamento del motore sia tale da richiedere l'attivazione della ventola e il flusso caldo dal motore sul condensatore potrebbe incidere negativamente sull'efficienza del sistema A/C. Oppure di contro può accadere che in una prova più lunga, il sistema di AFM riesca a garantire la giusta portata di aria per il raffreddamento del motore tale da non attivare mai la ventola. Ciò dipende dalla logica di controllo del veicolo in quanto conoscendo essa è possibile capire quando la ventola parte e in quali condizioni (purtroppo come già detto non è stato possibile conoscere tale logica in quanto è un dato posseduto dal costruttore). La certezza è che durante la prova con il veicolo in cui è presente il sistema di air flow management la ventola non è partita e ciò ha garantito risparmio energetico evidenziato in figura 73.

CAPITOLO 5

CONCLUSIONI

5.0 RIASSUNTO DEI RISULTATI OTTENUTI

Lo scopo delle prove a velocità costante è stato quello di studiare come reagisce il sistema pompa di calore alla presenza del sistema AFM e in particolare la durata di tale prove è stata tale da verificare la presenza della fase critica del sistema, la fase *icing*. Dai risultati riassunti nella tabella 7 è possibile affermare che al di fuori della prova a 40km/h manuale le altre prove presentano tale fase e dunque in esse, lungo la superficie condensatore esterno, è avvenuta la formazione dello strato di ghiaccio. Nella prova a 40km/h invece, la formazione di quest'ultimo non è avvenuta e dunque si può dire che il sistema AFM ha evitato la sua formazione.

Prove a velocità costante						
	[km/h]	[min]	[-]	[-]	[rpm]	[-]
Tipologia prova	Velocità	Durata prova	Presenza fase icing	Attivazione ventola	max numero di giri compressore durante la prova	Comando De-icing
Manuale	20	120	Si	Si	7000	si
Manuale	40	160	No	Si	4000	no
Automatico	20	120	Si	No	7000	si
Automatico	40	160	Si	No	7000	si

TABELLA 7: risultati delle prove a velocità costante.

Le prove con il ciclo guida invece hanno avuto lo scopo di verificare il consumo delle batterie e l'incidenza che ha il sistema AFM su di esso. La sua presenza infatti ha lo scopo di ritardare la fase *icing* e dunque ridurre il consumo del compressore. La durata di esse è stata troppo breve per evidenziare la presenza di tale fase ma è stata tale da verificare il consumo delle batterie per le 4 prove. Sia in funzionamento in pompa di calore che in aria condizionata, si riesce ad ottenere un beneficio grazie alla presenza del sistema AFM. In tabella 8 sono riassunti i risultati ottenute per le 4 prove.

Prove con ciclo guida WLTP				
	[min]	[-]	[-]	[kWh]
	Durata prova	Presenza fase icing	Attivazione ventola	Consumo energia
H/P-AFM	30	No	Si	3,91
H/P-NP			No	4,32
A/C-AFM			No	3,15
A/C-NP			Si	3,8

TABELLA 8: risultati delle prove con ciclo guida.

5.1 CONCLUSIONE E APPLICAZIONI FUTURE

La tesi ha avuto come fine l'analisi di un problema comune a tutte le pompe di calore con evaporatore ad aria la cui la formazione di ghiaccio risulta essere un limite importante del loro funzionamento. Da come si è spiegato più volte, il problema oltre ad essere funzionale è anche energetico, con un incremento del consumo di energia da parte del sistema che agisce per compensare l'effetto dovuto alla formazione dello strato di ghiaccio. In particolare l'analisi si è concentrata sul sistema A/C di un veicolo elettrico la cui autonomia delle batterie risulta essere ancora un limite invalicabile del loro funzionamento. Questo perché, a differenza di un veicolo con motore termico, un veicolo full-electric non presenta una grande flessibilità e, una volta scaricata la batteria, il tempo per la ricarica, per le attuali batterie in commercio, risulta essere lunga e ciò non si adegua con le tempistiche che un individuo necessita nella sua vita quotidiana. Non potendo agire sulle batterie e sul tempo di ricarica a causa dei limititecnologici, si lavora per aumentare la loro autonomia ideando sistemi che consentono un risparmio energetico (anche un chilometro in più risulta essere prezioso per questi tipi di veicoli).

La presenza nel motore della ventola di raffreddamento ha suscitato curiosità e ha dato vita all'idea di sfruttare il flusso di aria calda per ritardare la formazione di ghiaccio (la cui presenza è purtroppo inevitabile) e dunque migliorare l'efficienza del sistema, garantendo un risparmio energetico e migliorando l'autonomia delle batterie. Il sistema di air flow management è stato lo strumento che ha permesso di fare ciò e, nonostante i suoi limiti, è riuscito a indirizzare il giusto flusso di aria in prossimità del condensatore esterno, riuscendo a fornire qualche risultato interessante. Essendo in fase prototipale, non si è tenuto conto della qualità dei materiali utilizzati, della geometria dei condotti o della matematica del sistema; ciò nonostante la sua presenza si è rivelata interessante. Ciò spinge a dire che, nell'eventualità in cui questo progetto verrà portato avanti, l'ottimizzazione del sistema potrebbe dare risultati più interessanti e magari un'applicazione di questo tipo potrebbe essere presente nelle vetture elettriche future. Questo dipenderà ovviamente dall'interesse delle case automobilistiche e dalle architetture dei futuri motori in quanto non è detto che in un futuro prossimo sarà ancora presente la ventola o un qualunque altro tipo di sistema di raffreddamento ad aria.

Infine è stato interessante anche il risultato delle analisi nel funzionamento in aria condizionata. Ciò perché, da quel poco che ne è uscito fuori, la sua presenza ha permesso di raffreddare il motore senza fare partire la ventola, garantendo un ulteriore risparmio energetico. Ovviamente in questo ultimo caso, sono necessari ulteriori approfondimenti perché potrebbe capitare che, con una guida più spinta, la ventola del motore venga azionata e ciò potrebbe determinare delle conseguenze negative, peggiorando il funzionamento e il consumo da parte del sistema A/C. In quest'ultimo caso, per evitare tale effetto, durante il funzionamento in aria condizionata, si potrebbe aggiungere al sistema una valvola che consentirebbe di deviare il flusso di aria mandata dalla ventola verso l'esterno evitando l'interazione tra quest'ultima e il condensatore esterno.

Il lavoro compiuto è servito come punto di inizio per eventuali studi futuri concentrati sull'ottimizzazione dell'energia spesa dalle batterie di un veicolo elettrico che in questo ultimo periodo sta suscitando sempre più interesse, sia da parte dei clienti che da parte delle case automobilistiche le quali si trovano a dover risolvere problemi intrinseci e limitanti per questa tipologia di veicoli.

BIBLIOGRAFIA

- *Termodinamica e trasmissione del calore – Yunus A. Cengel;*
- *Teknicar- impianto di climatizzazione automotive;*
- *Heywood, J.B. “Internal Combustion Engine Fundamentals”, McGraw Hill, 2nd edition, 2018;*
- *A.E. Catania, Complementi di Macchine, Ed. Levrotto & Bella, Torino, 1979;*
- *Quattroruote- Editoriale Domus;*
- *Sito ufficiale Renault Zoe;*
- *Auto- Conti Editore;*
- *Auto elettrica- Giovanni De Michele, Sandit Libri, 27 maggio 2012;*

