



Università Politecnica delle Marche

Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile

DICEA – Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Architettura

**Ottimizzazione del Thermal Management di apparecchiature AV
IT all'interno di una rack room in ambito Mega Yacht mediante
analisi sperimentale e modellazioni fluidodinamiche.**

Thermal Management of IT AV equipment inside a Mega Yacht rack room
through experimental analysis and fluid dynamics modelling.

Relatore:

Prof. Marco D'Orazio

Tesi di Laurea di:

Giovannangelo Sandro

Anno accademico 2021/2022

INDICE

1. INTRODUZIONE	1
1.1. Thermal Management e Rack Room	1
1.2. Scopo della Tesi	1
2. PANORAMICA DEL CONTESTO	3
2.1. Contesto Ambientale	3
2.2. Contesto Tecnologico	4
2.3. Contesto Infrastrutturale	4
3. STATO DELL'ARTE	5
3.1. Introduzione	5
3.1.1. Requisiti ambientali e carico termico nei Data Center	5
3.2. Panoramica del sistema di Raffreddamento	6
3.2.1. Sistemi raffreddati ad Aria	7
3.3. Utilizzo in ambito marino	9
4. PROGETTAZIONE	10
4.1. Caratterizzazione dei singoli elementi	12
4.1.1. UPS	12
4.1.2. Amplificatori	16
4.1.3. Router-Switch	17
4.1.4. Alimentatori	20
4.1.5. Trasformatori	21
4.2. Flusso d'aria dei componenti, Progettazione dell'alloggiamento e dissipazione per irraggiamento	23
4.3. Flusso d'aria all'interno degli alloggiamenti	25
4.3.1. Studio del flusso d'aria: Passivo (Convezione)	26
4.3.2. Studio del flusso d'aria: Aria Forzata (Active Thermal Management)	29
4.3.3. Filtri e contenitori Pressurizzati	31
4.3.4. Scambiatori di calore & Aria Condizionata	32
5. METODOLOGIA	33
5.1. Attività Sperimentali - Studio e descrizione del Main Rack della navetta 33.21	34
5.1.1. Posizione del Main Rack	34
5.1.2. Schema di condizionamento	35
5.1.3.1. Involucro esterno, materiali e dimensioni	35
5.1.3.2. Tipologia e dimensioni dei pannelli Rack	36
5.1.4. Schema di funzionamento, sezioni e prospetti	37

5.1.5.	Caratteristiche dell'aspiratore.....	38
5.2.	<i>Analisi Sperimentale</i>	39
5.2.1.	Posizionamento delle sonde.....	39
5.3.	<i>Analisi dei Dati</i>	42
5.4.	<i>Attività di Simulazione</i>	52
5.4.1.	Caso studio – Main Rack della Navetta 33.21	54
6.	RISULTATI	57
6.1.	<i>Attività Sperimentali – Analisi dei Grafici</i>	57
6.2.	<i>Attività di Simulazione – Analisi dei flussi</i>	59
7.	CONCLUSIONI	67
	RIFERIMENTI	68

1. INTRODUZIONE

La gestione termica efficiente delle apparecchiature elettroniche all'interno di un rack è un fattore critico per garantire l'affidabilità e la durata nel tempo.

Con l'aumento della densità di potenza dei sistemi, la generazione di calore diventa un problema sempre più importante da affrontare. Il corretto smaltimento del calore è fondamentale per prevenire il surriscaldamento, che potrebbe causare danni permanenti alle componenti elettroniche. Per questo motivo, è necessario trovare soluzioni che permettano di gestire in modo efficace il flusso di aria all'interno del rack e il trasferimento termico dai dispositivi all'ambiente circostante.

Il focus di questa tesi è quindi sull'ottimizzazione del Thermal Management di apparecchiature AV IT all'interno di un rack, mediante l'utilizzo di tecniche sperimentali e modellazioni fluidodinamiche.

1.1. Thermal Management e Rack Room

Il Thermal Management è una sfida critica per le apparecchiature Audio e Video (AV) e Information Technology (IT) all'interno di una rack room. La gestione del calore è fondamentale per garantire la sicurezza degli operatori, il funzionamento delle apparecchiature e la loro durata. Tuttavia, le condizioni ambientali estreme e i fabbisogni energetici di questi sistemi sugli yacht rendono la gestione del calore molto complessa.

L'ottimizzazione del Thermal Management è il processo attraverso il quale si cerca di ottenere il massimo rendimento termico delle apparecchiature elettroniche all'interno di un ambiente chiuso, come una rack room in ambito yacht. Il suo scopo principale è quello di garantire il corretto funzionamento prolungandone la durata, riducendo il rischio di malfunzionamenti e danni irreversibili.

1.2. Scopo della Tesi

La tesi mira a fornire una panoramica delle sfide del Thermal Management sugli yacht e a proporsi come una guida per la progettazione di sistemi ottimizzati per la gestione del calore. Verranno esplorate le condizioni ambientali estreme e i fabbisogni energetici delle apparecchiature AV-IT presenti sugli yacht, e verranno valutate le tecnologie disponibili per la gestione del Thermal Management.

La tesi si concentrerà sull'importanza dell'argomento e sui benefici che si possono ottenere dall'ottimizzazione del Thermal Management a livello tecnico. Infine, verrà presentata una

progettazione dettagliata di un sistema di Thermal Management ottimizzato per gli yacht, tenendo conto di tutti gli aspetti del contesto.

La tesi si propone di fornire un contributo significativo alla comprensione del Thermal Management sugli yacht e di fornire una soluzione progettuale praticabile e sostenibile per gli operatori del settore.

2. PANORAMICA DEL CONTESTO

2.1. Contesto Ambientale

La navigazione in mare può esporre gli yacht a condizioni ambientali estreme, come alte temperature, umidità elevata e vibrazioni. Queste condizioni possono rendere difficile la gestione del calore delle apparecchiature AV-IT, aumentando il rischio di surriscaldamento e di guasto.

In primo luogo, le *alte temperature* possono essere un problema significativo per la gestione del calore sugli yacht. La temperatura dell'aria in mare può raggiungere livelli estremi sia in estate che in inverno a seconda delle latitudini, e questo può causare surriscaldamento delle apparecchiature AV-IT se non collocate in un ambiente climatizzato. Inoltre, le apparecchiature AV-IT sugli yacht possono essere esposte a radiazione solare diretta, aumentando ulteriormente il rischio di surriscaldamento.

In secondo luogo, *l'umidità elevata* può essere un problema per la gestione del calore sugli yacht. L'umidità può causare condensa all'interno delle apparecchiature AV-IT, aumentando il rischio di cortocircuiti e di danni alle componenti elettroniche. Inoltre, l'umidità può favorire la formazione di muffe e di batteri all'interno delle apparecchiature AV-IT, aumentando il rischio di malfunzionamenti.

In terzo luogo, *le vibrazioni* possono essere un problema per la gestione del calore sugli yacht. Le apparecchiature AV-IT sugli yacht possono essere soggette a vibrazioni a causa del moto ondoso e delle attività di navigazione. Le vibrazioni possono causare danni alle componenti meccaniche delle apparecchiature AV-IT e possono influire sulla precisione delle misurazioni delle temperature.

Per gestire il problema del Thermal Management sugli yacht, è importante utilizzare sistemi di raffreddamento adeguati. Sistemi di raffreddamento a liquido, ventole, dissipatori di calore e sistemi di raffreddamento ad aria condizionata sono tutti metodi comuni utilizzati per ridurre la temperatura delle apparecchiature AV-IT sugli yacht. Tuttavia, questi sistemi devono essere progettati e dimensionati in modo appropriato per garantire che siano in grado di gestire la quantità di calore generato dalle apparecchiature AV-IT e adattarsi alle condizioni ambientali estreme.

Inoltre, per evitare danni alle apparecchiature AV-IT, è importante mantenere una corretta ventilazione delle rack room, utilizzare sistemi di filtraggio dell'aria per rimuovere polvere e umidità e prevedere sistemi di monitoraggio e allarme per rilevare eventuali anomalie nella temperatura e umidità.

È importante utilizzare materiali e componenti a bassa emissione di calore per le apparecchiature AV-IT e utilizzare tecnologie di risparmio energetico come l'alimentazione a bassa tensione e l'alimentazione a batterie per ridurre i fabbisogni energetici delle apparecchiature AV-IT.

In sintesi, la gestione del Thermal Management sugli yacht richiede un'attenta pianificazione e una progettazione adeguata a garantire che le apparecchiature AV-IT siano protette dalle condizioni ambientali estreme e che i fabbisogni energetici siano gestiti in modo efficiente. Utilizzando tecnologie e metodi adeguati, è possibile migliorare la sicurezza, l'affidabilità e l'efficienza delle apparecchiature AV-IT sugli yacht.

2.2. Contesto Tecnologico

Il contesto tecnologico delle apparecchiature AV-IT sugli yacht è caratterizzato da una vasta gamma di apparecchiature e sistemi che soddisfano esigenze diverse

Ci sono sistemi di intrattenimento, che comprendono televisori, impianti audio, sistemi di home theater e sistemi di gioco. Queste apparecchiature richiedono una quantità significativa di energia elettrica e possono generare un significativo calore. Sistemi di monitoraggio come telecamere di sorveglianza, sistemi di navigazione e comunicazione, come radar, GPS, e sistemi di comunicazione satellitare.

In sintesi, il contesto tecnologico delle apparecchiature AV-IT sugli yacht è caratterizzato da una vasta gamma di apparati e sistemi che soddisfano esigenze diverse e richiedono una gestione adeguata del calore e una protezione dalle condizioni ambientali estreme per garantire un funzionamento sicuro e affidabile.

2.3. Contesto Infrastrutturale

Le rack room sugli yacht sono spesso piccole e con spazi limitati, il che può rendere difficile la gestione del calore delle apparecchiature AV-IT.

Gli spazi sono limitati e non sempre è possibile installare sistemi di raffreddamento adeguati o sistemi di ventilazione. La mancanza di un'adeguata ventilazione e l'alto tasso di umidità all'interno di una rack room possono causare problemi di surriscaldamento e di condensa sull'impianto.

Per risolvere questi problemi potrebbe essere necessario utilizzare tecnologie e materiali resistenti alle condizioni estreme e prevedere sistemi di protezione per i sistemi AV-IT.

Inoltre, per garantire la corretta ventilazione della rack room, potrebbe essere necessario installare sistemi meccanici, come ventole, dissipatori di calore e sistemi di raffreddamento ad aria condizionata. Potrebbe essere necessario inoltre utilizzare strumenti di filtraggio dell'aria per rimuovere polvere e umidità.

3. STATO DELL'ARTE

Astratto

Il numero, le dimensioni, la complessità e la densità energetica crescenti dei data center a causa della crescente domanda di storage, networking e calcolo comportano una notevole sfida energetica. Sono allo studio diverse misure per migliorare l'efficienza energetica, non solo per consentire una crescita sostenibile del settore, ma anche per ridurre i costi operativi. Il consumo di energia per il raffreddamento costituisce una parte importante del consumo totale dei data center, che può arrivare fino al 40% nel caso di sistemi di raffreddamento inefficienti.

L'attenzione verrà posta sui sistemi raffreddati ad aria in quanto presenti nella parte sperimentale di questa tesi.

3.1. Introduzione

La crescente domanda di elaborazione dati negli ultimi anni insieme ai progressi della tecnologia informatica ed elettronica ha prodotto una rapida crescita nel settore dei data center. La crescita del numero di Data Center (DC) e delle densità di potenza sta portando ad un aumento della domanda di energia. Secondo [1], l'elettricità totale utilizzata nei data center è raddoppiata tra il 2000 e il 2005 ed è cresciuta del 56% tra il 2005 e il 2010. Inoltre, nel 2010 il settore dei data center era responsabile dell'1,3% del consumo mondiale di elettricità e del 2% di quello statunitense. consumo di elettricità [1]. Si stima che il consumo di energia aumenterà del 15-20% all'anno nel prossimo futuro [2].

Il consumo è dovuto principalmente al fabbisogno di alimentazione e raffreddamento IT. Un sistema di raffreddamento è fondamentale per mantenere le apparecchiature IT funzionanti in modo sicuro e affidabile e può rappresentare fino al 40% del consumo totale di energia.

Il miglioramento dell'efficienza di un sistema di raffreddamento può quindi rappresentare una grande opportunità per il risparmio energetico e di costi.

3.1.1. Requisiti ambientali e carico termico nei Data Center

Un Data Center dovrebbe essere adeguatamente raffreddato perché la dissipazione del calore è un fattore cruciale da considerare per la disponibilità e l'affidabilità delle apparecchiature IT.

I progressi nell'industria dei microprocessori si traducono in un numero in continua crescita di transistor e frequenze di clock, che a loro volta causano un drammatico aumento del calore. Un'elevata densità di calore può causare un aumento di temperatura tale da influire

sull'affidabilità dei componenti IT, infatti, la principale causa di guasto è l'alta temperatura [4].

Un sistema di raffreddamento deve essere in grado di ottenere un controllo completo della temperatura. Per assolvere a questo compito, sono stati definiti valori limite ambientali per garantire il corretto funzionamento delle apparecchiature. La richiesta di potenza di un server può variare con il lavoro effettivo svolto, ma anche quando il server funziona al 20% o al di sotto, il consumo di energia è compreso tra il 60-100% [2].

Per evitare guasti è importante mantenere questi componenti entro certi limiti di temperatura. Ad esempio, come sottolineato in [2, 3] la maggior parte dei ricercatori considera 85°C la temperatura massima consentita per evitare malfunzionamenti.

Al fine di mantenere le temperature delle apparecchiature IT entro i limiti e per aiutare gli operatori dei data center a raggiungere l'affidabilità e l'efficienza energetica, ASHRAE ha pubblicato "*Thermal guidelines for data processing environments*" [5]. Fornisce le condizioni ambientali appropriate per ridurre al minimo i rischi di guasto.

Esse si riferiscono alla temperatura e all'umidità relativa (RH) dell'aria in ingresso alle apparecchiature informatiche.

Una temperatura a bulbo secco compresa tra i 18°C e 27°C e umidità relativa del 60% sono le condizioni ambientali operative della maggior parte delle apparecchiature.

3.2. Panoramica del sistema di Raffreddamento

Praticamente tutta l'energia elettrica richiesta in un data center viene convertita in calore, che deve essere rimosso da un adeguato sistema di raffreddamento.

La soluzione di raffreddamento più adatta dovrebbe essere progettata per coprire lo scenario peggiore, sebbene la maggior parte dei server generalmente funzioni ad una capacità molto inferiore al 100%.

I sistemi raffreddati ad aria rappresentano la spina dorsale del raffreddamento dei data center e si stanno evolvendo nel corso degli anni per far fronte al progresso delle apparecchiature.

Questa evoluzione del sistema ad aria sta andando verso unità di raffreddamento localizzate e la separazione fisica del flusso d'aria all'interno del data center stesso.

Dall'altra parte si stanno configurando soluzioni alternative come i sistemi raffreddati a liquido, utilizzati specialmente per il raffreddamento dei data center ad alta densità di potenza.

3.2.1. Sistemi raffreddati ad Aria

L'apparecchiatura di raffreddamento del terminale dovrebbe fornire aria con la giusta capacità di raffreddamento e con una corretta distribuzione.

Come affermato in [6], ci sono diversi parametri che potrebbero influenzare l'efficienza di raffreddamento, come l'altezza del soffitto, dove può verificarsi la stratificazione dell'aria calda, l'altezza del pavimento sopraelevato/controsoffitto, importante per ottenere una corretta distribuzione dell'aria tra le apparecchiature IT e del flusso d'aria nella stanza.

Sono stati identificati due principali problemi di distribuzione dell'aria nel data center, l'aria di by-pass e l'aria di ricircolo [7].

L'aria di ricircolo si verifica quando il flusso d'aria all'apparecchiatura non è sufficiente e parte dell'aria calda viene ricircolata, il che si traduce in una notevole differenza tra la temperatura di ingresso nella parte inferiore e quella superiore del rack [6].

Il by-pass dell'aria fredda si verifica a causa di un'elevata portata o di perdite attraverso il percorso dell'aria fredda. In questo caso, parte del flusso di aria fredda entrante salta direttamente all'aria di scarico senza contribuire al processo di raffreddamento [8].

Questa cattiva gestione dell'aria si traduce in una bassa efficienza di raffreddamento e genera un circolo vizioso di aumento della temperatura locale [9].

Infatti, come evidenziato in [10] circa un rack su dieci lavora con una temperatura superiore alle raccomandazioni standard e la maggior parte degli hot-spot si verificano in data center con carico leggero, indicando che la causa principale degli hot-spot è una cattiva gestione dell'aria .

Al fine di prevenire punti caldi, di solito la temperatura del sistema di raffreddamento è impostata al di sotto dei requisiti IT [11].

La tabella mostra un esempio di temperatura di esercizio per un sistema raffreddato ad aria dal refrigeratore al rack.

Example of working temperatures for air cooling system			
Location	Medium	Temperature [°C]	
		Supply	Return
Chiller	Water	10-13	15-18
CRAH	Water	10-13	15-19
CRAH	Air	15-25	30-40
Rack	Air	17-27	35-40

Come sottolineato in [12], questa soluzione è efficace per densità di potenza di circa 1-2 kW per rack.

Il primo passo per migliorare l'efficienza è l'impiego di un efficace contenimento dei corridoi. Il contenimento dei corridoi caldi (o freddi) è una delle strategie più efficaci e meno costose per migliorare l'efficienza energetica di un data center. Il contenimento consente la separazione fisica dei flussi d'aria, evitando così problemi di ricircolo o bypass. Un'analisi teorica di Niemann et al. [11] mostra che tra il contenimento del corridoio freddo e quello del corridoio caldo quest'ultimo (HACS)¹ è la soluzione migliore. È anche conveniente localizzare l'apparecchiatura di raffreddamento del terminale più vicino alla sorgente per ottenere una migliore distribuzione del flusso d'aria.

Le soluzioni di raffreddamento per camera, fila o rack forniscono la stessa quantità di capacità di raffreddamento, ma sono caratterizzate da diversi metodi di distribuzione dell'aria, di conseguenza sono caratterizzati da una diversa efficienza di raffreddamento e costo di capitale.

I sistemi di raffreddamento in-row e rack hanno infatti il vantaggio di un percorso del flusso d'aria più breve che consente una riduzione del fabbisogno di potenza della ventola e quindi una maggiore efficienza; Inoltre, producono una mitigazione o eliminazione dei fenomeni di ricircolo.

La soluzione di raffreddamento in fila può essere ottenuta posizionando l'apparecchiatura di raffreddamento del terminale tra i rack o sopra la testa.

La soluzione di raffreddamento basata su rack può avere un design chiuso o aperto.

Nel design chiuso i server e le apparecchiature di raffreddamento del terminale sono alloggiati all'interno dell'involucro del rack chiuso e quindi il flusso d'aria è completamente isolato dal resto del data center [12].

Il disegno aperto al contrario, come proposto da Almoli et al. [13], è caratterizzato da uno scambiatore di calore della porta posteriore che condivide con una soluzione room-based il compito di raffreddare le apparecchiature informatiche. La porta posteriore può essere attiva, se dispone di ventole dedicate al controllo del flusso d'aria;

Queste soluzioni possono essere implementate in data center esistenti, consentendo l'utilizzo di rack ad alta densità, isolandoli dal sistema di raffreddamento basato sulla stanza.

¹ Hot Aisle Containment System

3.3. Utilizzo in ambito marino

L'ottimizzazione del Thermal Management in ambito yacht diviene particolarmente importante poiché le apparecchiature elettroniche sono soggette a condizioni ambientali estreme, come elevati livelli di umidità e variazioni di temperatura e pressione. Inoltre, le apparecchiature elettroniche sono spesso installate in spazi ristretti e con limitate possibilità di ventilazione, il che rende ancora più importante l'ottimizzazione del Thermal Management.

In generale, l'ottimizzazione del Thermal Management in ambito yacht può contribuire a:

- Prolungare la durata delle apparecchiature elettroniche, riducendo il rischio di malfunzionamenti e danni irreversibili;
- Migliorare le prestazioni delle apparecchiature elettroniche, garantendo che funzionino correttamente anche in condizioni ambientali estreme;
- Ridurre i costi di manutenzione e riparazione delle apparecchiature elettroniche;
- Migliorare la sicurezza degli operatori, evitando situazioni di pericolo causate da surriscaldamento o condizioni ambientali estreme.

Ad oggi, non sono presenti in letteratura studi specialistici che associano il mondo marino e delle imbarcazioni al Thermal Management dei Rack.

4. PROGETTAZIONE

Il mantenimento della temperatura all'interno degli involucri è fondamentale per il corretto funzionamento e la sopravvivenza dei componenti che operano al loro interno. Il modo migliore per controllare questa temperatura è adottare un approccio sistemico (Integrato) alla gestione termica.

La progettazione termica dei rack e degli armadi per apparecchiature è essenziale per garantire la funzionalità dei device e del sistema, quando sono soggetti all'ambiente circostante.

È stato dimostrato che il calore riduce sostanzialmente la durata della maggior parte delle apparecchiature, il che rende fondamentale progettare la rimozione di questo calore.



30 °C è la temperatura di esercizio costante massima consigliata per la maggior parte delle apparecchiature; contribuirà a fornire una lunga durata per l'apparecchiatura all'interno di un contenitore.

Il mantenimento della temperatura all'interno degli involucri è fondamentale per il corretto funzionamento e la sopravvivenza dei componenti che operano al loro interno. Il modo migliore per controllare questa temperatura è adottare un approccio sistemico (Integrato) alla gestione termica.

La progettazione termica dei rack e degli armadi per apparecchiature è essenziale per garantire la funzionalità dei device e del sistema, quando sono soggetti all'ambiente circostante.

È stato dimostrato che il calore riduce sostanzialmente la durata della maggior parte delle apparecchiature, il che rende fondamentale progettare la rimozione di questo calore.

Ci sono tre flussi d'aria che devono essere considerati:

il primo è come il componente scarica il calore; il secondo è come questo calore entra, viaggia attraverso e poi esce dall'involucro del rack; infine, come l'aria si muove all'interno della stanza e viene rimossa. Le interazioni tra questi flussi d'aria sono importanti e devono essere presi in considerazione quando si adotta un approccio sistemico.

Ci sono alcuni concetti base da ricordare quando si progetta un sistema di gestione termica:

- Il calore sale, anche chiamata convezione; quando possibile è sempre preferibile utilizzare la convezione in quanto più efficiente.
- L'obiettivo è quello di rimuovere l'aria calda generata dalle apparecchiature all'interno dell'armadio, non introdurre aria più fredda.

Per le apparecchiature digitali, la stanza stessa non dovrebbe essere più calda di 20 °C. Ciò fornisce una differenza di temperatura di 10 °C tra la stanza e la temperatura interna consigliata dell'armadio di 30 °C per una durata ottimale dell'apparecchiatura.

Tutto il calore (BTU/h) generato dall'apparecchiatura deve essere prima rimosso dall'armadio; quindi, la stanza deve avere la capacità di rimuovere il calore da tutti gli armadi. Molte installazioni non hanno il lusso di un ambiente climatizzato; quindi, sarà necessario considerare come la stanza stessa gestirà il calore proveniente dai rack.

È importante assicurarsi che il calore rimosso dall'armadio non aumenti in modo significativo la temperatura ambiente.

Più la stanza è fresca (rimanendo sempre al di sopra della temperatura di rugiada, in modo che non si formi condensa), meno ventole e CFM saranno necessari.

4.1. Caratterizzazione dei singoli elementi

Di seguito verranno elencati i principali componenti AV e IT solitamente collocati all'interno di un rack.

4.1.1. UPS

La sigla **UPS** "Uninterruptible Power Supply" ed è tradotta in italiano come Gruppo di Continuità. Il Gruppo di Continuità è una apparecchiatura che viene posta fra la rete di alimentazione ed i dispositivi da proteggere, allo scopo di fornire energia alle apparecchiature anche in mancanza di energia elettrica.

La produzione di calore dei sistemi UPS e di distribuzione dell'alimentazione consta di una *perdita fissa* e di una *perdita proporzionale* alla potenza di lavoro (operativa). È possibile eseguire un'analisi dettagliata con i dati di produzione termica di ciascun elemento, ma una rapida stima con semplici regole come quelli riportati nella tabella sottostante, fornisce risultati che rientrano nel normale margine di errore delle analisi più complesse.

Procedura:

Ottenere le informazioni richieste nella colonna "*dati necessari*". In caso di dubbi, consultare le seguenti definizioni di dati. Eseguire i calcoli della produzione di calore e

UPS con batteria	Potenza nominale del sistema di alimentazione in watt	$(0,04 \times \text{potenza del sistema}) + (0,06 \times \text{totale potenza di carico IT})$	_____ watt
------------------	---	---	------------

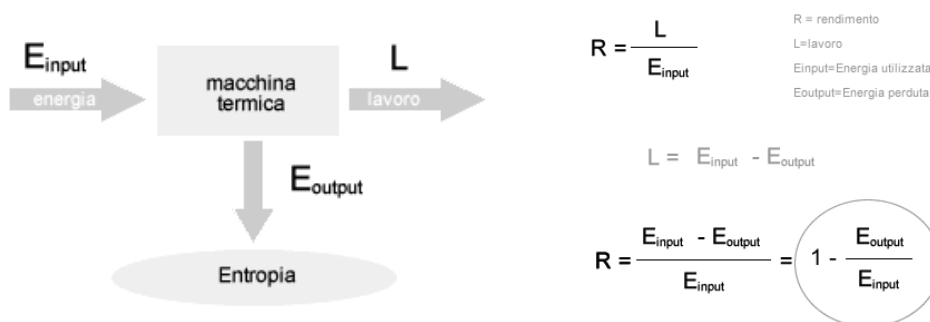
inserire i risultati nella colonna sottotale. Sommare i sottotali per ottenere la produzione di calore totale.

Definizione dei Dati

Potenza Nominale del sistema di alimentazione – la potenza del sistema UPS.

Per quanto riguarda gli **UPS**, i calcoli e i valori riportati dai vari fornitori sono abbastanza vaghi.

Si parla di rendimento pari a 1, quando nella realtà una macchina termodinamica non avrà mai un rendimento energetico pari a 1 (100%) ma bensì inferiore a causa delle dispersioni termiche dovute al passaggio di corrente all'interno dei componenti del singolo device.



Il White Paper 108 dell'azienda APC by Schneider Electric² afferma che:

Nella scheda tecnica di un UPS solo un numero è riconducibile all'efficienza, che quasi certamente viene considerata con un carico del 100% (nominale) in varie ulteriori condizioni favorevoli al sistema (ad esempio batterie totalmente cariche).

Il problema è che la maggior parte dei produttori di UPS espongono la stima dell'efficienza al 100% del carico, perché rappresenta la migliore condizione.

> La creazione della curva di efficienza di un UPS

Una curva di efficienza viene creata innanzitutto misurando l'energia fornita all'UPS (ingresso) e l'energia fornita dall'UPS al carico (uscita). Queste misurazioni vengono acquisite a vari livelli, generalmente al 25%, al 50%, al 75% e al 100% del carico. Viene acquisita una misurazione anche allo 0% del carico per quantificare l'energia assorbita dall'UPS stesso (perdite in assenza di carico). Da queste misurazioni vengono calcolate le perdite, sottraendo l'energia di ingresso da quella di uscita. Tali perdite, quindi, vengono riportate in un grafico, ricavando una linea di tendenza relativa ai punti del grafico. La linea di tendenza fornisce la formula con cui si possono tracciare tutti gli altri punti per ogni percentuale di carico. Una volta calcolate tutte le perdite energetiche, viene creata la curva di efficienza, esprimendo il rapporto tra energia di uscita e di ingresso rispetto al livello di carico.

² <<L'aumento dell'efficienza dei sistemi UPS di grandi dimensioni di Richard L. Sawyer>>

La **Figura – 1** illustra la forma basilare della curva di efficienza di un UPS. Il punto più alto della curva corrisponde alla massima efficienza (asse Y) e al massimo livello di carico (asse X). In questa curva, l'efficienza massima dell'UPS è pari al 93%. Per definire le specifiche di un UPS considerando un livello di carico realistico, l'utente deve individuare o sperimentare l'efficienza dell'UPS al livello di carico più frequente, ad esempio il 30%, che in questa curva è pari all'89%.

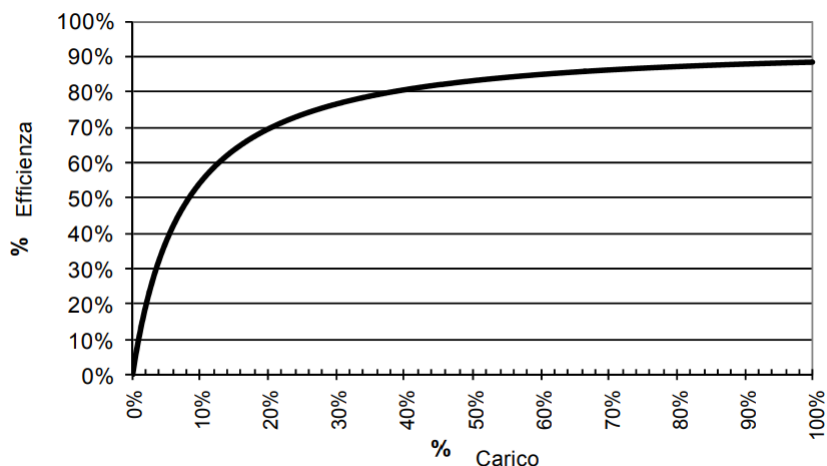


Figura – 1 curva di efficienza di un UPS.

La **figura – 2** è utile per approfondire il significato della curva di efficienza, identificando la destinazione di tutta l'energia.

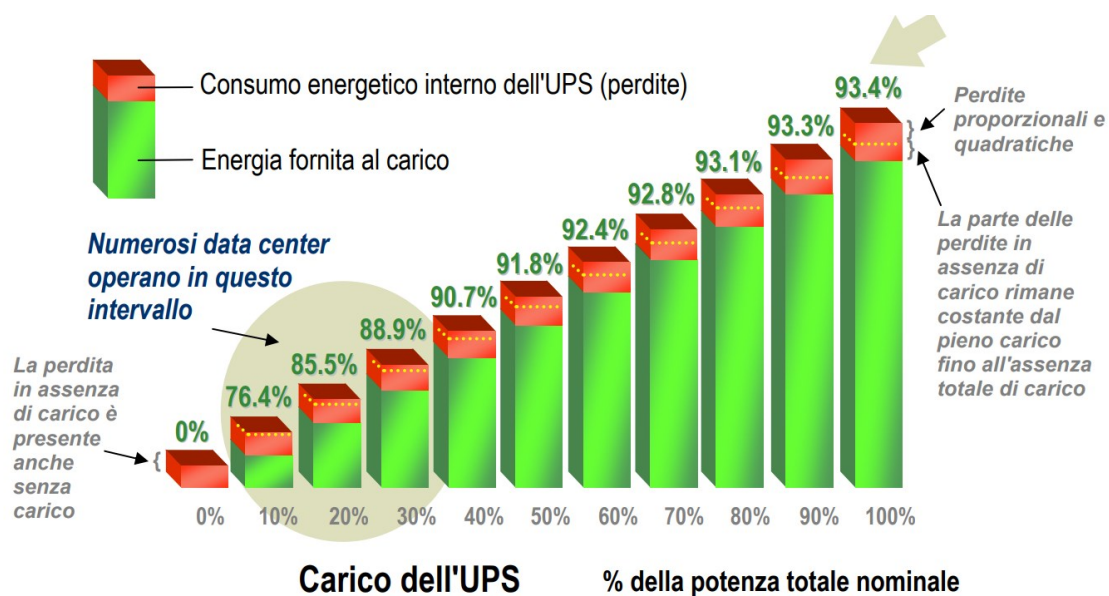


Figura – 2 Suddivisione dell'energia di ingresso totale dell'UPS.

Nella **figura – 2**, le barre verdi rappresentano tutta l'energia diretta al carico informatico, mentre le barre rosse rappresentano le perdite interne dell'UPS, che definiscono la curva di efficienza riportata nella **Figura – 1**. Considerando un UPS con un'efficienza ideale, tutta l'energia fornita all'UPS sarebbe destinata ai carichi del data center, per cui le barre sarebbero interamente verdi (senza perdite) per tutti i livelli di carico. In questo caso, la curva di efficienza sarebbe una linea orizzontale (100% per tutti i carichi). Come si desume dalle barre rosse, tuttavia, parte dell'energia d'ingresso viene utilizzata direttamente dall'UPS.

Le perdite degli UPS sono di tre tipi: *perdite in assenza di carico*, *perdite proporzionali* e *perdite basate sulla legge quadratica*.

- **Perdite in assenza di carico:**

Con un carico dello 0%, tutta l'energia viene utilizzata in ingresso dall'UPS; come si evince, queste perdite non dipendono dal carico e derivano dall'alimentazione di elementi come i trasformatori, i condensatori, le schede logiche e le schede di comunicazione. Le perdite in assenza di carico possono rappresentare oltre 40% di tutte le perdite di un UPS.

- **Perdite proporzionali:**

Maggiore è il carico a cui viene sottoposto l'UPS, maggiore sarà la quantità di energia che deve essere trasformata dai componenti.

- **Perdite quadratiche:**

Maggiore è il carico a cui viene sottoposto l'UPS, maggiore sarà la corrente elettrica che percorre i suoi componenti. Questa condizione determina nell'UPS perdite proporzionali al quadrato della corrente, ovvero, le perdite dovute all'energia dissipata sotto forma di calore sono proporzionali al quadrato della corrente

Le perdite in base alla legge quadratica possono aumentare notevolmente (1-4%) al crescere del carico a cui è sottoposto l'UPS.

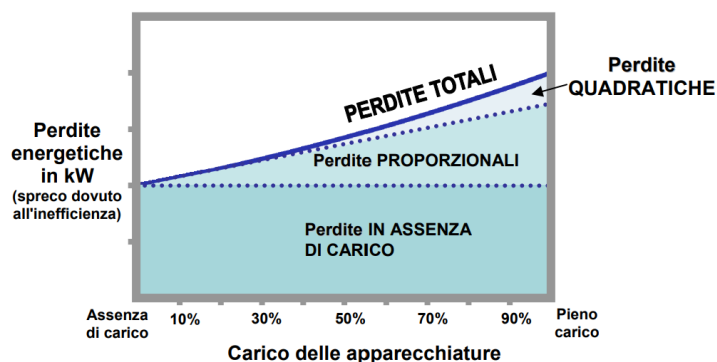


Figura – 3 Grafico che rappresenta i tre tipi di perdite relative alla percentuale di carico UPS.

4.1.2. Amplificatori

L'amplificatore è uno strumento utilizzato per amplificare il suono che arriva da una sorgente esterna e, per funzionare, deve avere una fonte di corrente sempre attiva; l'amplificatore ha essenzialmente due porte, un input e un output (maggiori se nel caso di amplificatori a più canali).



Gli amplificatori non sono così semplici, a causa della diversa natura dei circuiti e di altre variabili. Prendendo in considerazione l'output si trova sull'amplificatore, il tipo di alimentazione, cosa viene riprodotto, gli Ohm degli speaker, la percentuale di utilizzo dell'amplificatore, i BTU/h possono essere stimati.

Gli amplificatori sono disponibili in molte classi, in base ai loro gradi di efficienza. Le classi **A**, **B**, **AB** e **D** sono alcuni esempi.

Nella fascia bassa dello spettro di efficienza termica si trovano gli amplificatori di classe A, i quali non hanno un'efficienza media superiore al 20%, il che significa che l'80% della corrente assorbita dalla linea verrà convertito in calore. È estremamente raro trovare questa classe di amplificatori installati in banchi di rack.

All'altra estremità dello spettro di efficienza termica, gli amplificatori di classe D hanno fino al 90% dei Watt assorbiti dal cavo di alimentazione convertiti in watt utilizzabili in uscita, il che significa che generano solo il 10% di calore di scarto. Gli amplificatori di classe D, per assurdo, hanno un rendimento maggiore sotto carico rispetto a quando sono al minimo.

Gli amplificatori di classe AB sono i più comuni; le misurazioni mostrano un'efficienza realisticamente conservativa di circa il 50%, anche se i produttori dichiarano valori più alti (60-70%).

Diversi produttori di amplificatori riconoscono l'importanza della pianificazione termica e pubblicano dati eccellenti su quanto calore in BTU/h venga generato per carichi variabili.

È altamente raccomandato richiedere ed ottenere queste informazioni sulle perdite di calore dagli amplificatori.

4.1.3. Router-Switch

La differenza fondamentale tra un router e uno switch è che il **Router** collega tra loro reti diverse, mentre, uno **Switch** connette più dispositivi per creare una rete locale

Il router funziona su un livello fisico, un livello di collegamento dati e un livello di rete, mentre uno switch funziona solo su livello di collegamento dati e livello rete.



Il focus di questa tesi si focalizza più sugli switch, dato che, dati ricavati da schede tecniche hanno evidenziato che la dispersione termica dei router è praticamente nulla, gli Switch sono dispositivi richiesti in numero maggiore nelle configurazioni all'interno dei rack, un

Router può gestire più Switch contemporaneamente e in generale uno Switch ha un consumo maggiore rispetto ad un Router.

Determinazione della produzione di calore di Switch PoE, PoE+ & UPoE

Gli Switch maggiormente utilizzati sono quelli che hanno caratteristiche PoE, per la loro capacità di poter alimentare dispositivi senza l'utilizzo di un'alimentazione dedicata. Gli Switch PoE si dividono in 3 categorie:

- **PoE**

PoE è un nuovo standard basato sul sistema Power Over Ethernet, il PoE consente ad un dispositivo alimentato, di ricevere una potenza PoE fino a 12.95 W, utilizzando solo due delle quattro coppie di fili disponibili nel cablaggio ethernet.

Lo **Switch PoE**, funzionando come una sorta di PSE (Power Sourcing Equipment), può fornire alimentazione ai dispositivi tramite cavi ethernet per realizzare la connettività di rete.

In genere, uno Switch 802.3af supporta il consumo energetico massimo fino a 15.4 W per porta PoE.

- **PoE+**

La tecnologia PoE+ (standard IEEE 802.3at) è un aggiornamento della tecnologia PoE, pubblicato nel 2009. I dispositivi alimentati sul mercato tendono a richiedere sempre più Watt, come i punti d'accesso Wireless che richiedono wattaggio PoE superiore a 12.95 W per funzionare normalmente; la tecnologia PoE+ è stata pensata proprio per risolvere questo problema: supportare un consumo energetico maggiore.

Simile allo Switch PoE, lo **Switch PoE+** fornisce un'alimentazione su due coppie, ma garantisce una classe di alimentazione aggiuntiva in grado di fornire potenza fino a 25.5 W per dispositivo.

La potenza massima erogata da ciascuna porta di uno Switch PoE+ è di 30 W.

- **PoE++/UPoE**

PoE++ è un ulteriore aggiornamento della tecnologia per incrementare la potenza. Può essere classificato in due tipi: Tipo 3 & Tipo 4.

- Tipo 3: Consente a due o a quattro coppie di fili di un cavo di rame di fornire alimentazione a un dispositivo fino a 51 W;
- Tipo 4: Permette al dispositivo di arrivare fino a 71W su quattro coppie di fili di un cavo ethernet.

Come aggiornamento dello Switch PoE e dello Switch PoE+, lo **Switch PoE++/UPoE** può fornire fino a 60 W su ciascuna porta PoE con il tipo 3 e fino a 100 W con il tipo 4

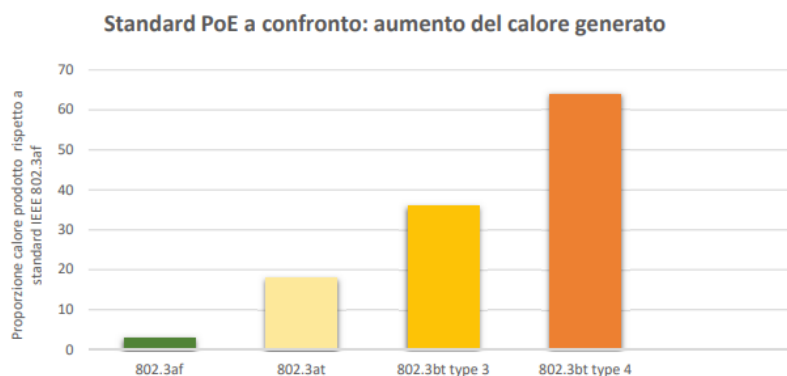
	PoE	PoE+	PoE++
Standard IEEE	IEEE 802.3af	IEEE 802.3at	IEEE 802.3bt
Tipo di PoE	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3 / Tipo 4
Potenza porta switch			
Potenza max per porta	15.4W	30W	60W / 100W
Range voltaggio	44-57V	50-57V	50-57V / 52-57V
Potenza dispositivo alimentato			
Potenza mx. Dispositivo	12.95W	25.5W	51W / 71W
Range voltaggio al dispositivo	37-57V	42.5-57V	42.5-57V / 41.1-57V
Cavi			
Coppie di fili utilizzate	2	2	2-4 / 4

Ovviamente i dati riportati sono indicativi, in quanto gli Switch della serie PoE spesso superano la capacità di alimentazione totale di uno Switch con più porte. Questo perché molti dispositivi utilizzeranno meno della potenza massima. Ad esempio, se si dispone di uno Switch con tutte porte PoE++ di tipo 4, non significa che verranno utilizzate tutte al massimo carico 24/7.

Di conseguenza è necessario calcolare i requisiti di assorbimento per tutti i dispositivi alimentati che si prevede di collegare allo Switch.

I sistemi PoE presentano alcune criticità³:

- Aumento della temperatura all'interno dei cavi di rete a causa del passaggio della corrente necessaria ad alimentare i dispositivi connessi: i conduttori del cavo, infatti, avendo una loro resistenza, dissipano potenza che genera calore. Studi rilevano che la generazione di calore in applicazioni 802.3bt Type 4 è 20-25 volte maggiore rispetto a quella prodotta dall'utilizzo di dispositivi 802.3af (Type 1).



³ Dal documento di *Qubix S.p.A. networking solutions: Cablaggio Strutturato per applicazioni Power Over Ethernet <<Fattori da considerare per il dimensionamento di un cablaggio strutturato a supporto della tecnologia PoE>>*

Ricapitolando, le principali differenze tra gli Switch PoE, PoE + e PoE ++ risiedono nella modalità di lavoro e nell'alimentazione, che si riflettono sulle loro applicazioni. Uno Switch 802.3af viene solitamente utilizzato per supportare dispositivi che richiedono un'erogazione di potenza inferiore a 15,4 W, come sensori, misuratori, punti di accesso wireless con due antenne e semplici telecamere di sorveglianza statiche, che non possono eseguire panoramiche, inclinazioni o ingrandimenti. Per quanto riguarda lo Switch PoE +, supporta dispositivi come telecamere di sorveglianza più complesse, che eseguono panoramica, inclinazione o zoom, nonché punti di accesso wireless con sei antenne e telefoni IP video. Con un wattaggio di potenza maggiore, lo Switch PoE++ di tipo 3 può supportare dispositivi come componenti di sistemi di videoconferenza e dispositivi di gestione degli edifici. E lo Switch PoE ++ di tipo 4 può supportare dispositivi come laptop e TV.

4.1.4. Alimentatori

Determinazione della produzione di calore negli Alimentatori

Un alimentatore raffreddato a piastra, o baseplate, ha la maggior parte dei componenti che producono calore, come Transistor anche chiamato FET⁴ (substrato di materiale semiconduttore, solitamente in silicio, al quale sono applicati quattro terminali: *gate* (porta), *source* (sorgente), *drain* (pozzo), *bulk* (substrato); quest'ultimo, se presente, è generalmente connesso al *source*. Il principio di funzionamento del transistor si fonda sulla possibilità di controllare la conduttività elettrica del dispositivo, e quindi la corrente elettrica che lo attraversa, mediante la formazione di un campo elettrico al suo interno.

L'alimentatore è poi installato all'interno del contenitore sigillato, così che lo stesso involucro possa funzionare come dissipatore; in alternativa, il calore può essere trasferito dalla scatola ad un dissipatore aggiuntivo montato esternamente. A questo proposito, è importante verificare a priori se la scatola possa fungere da dissipatore ed essere sufficientemente grande da condurre il calore fuori dall'unità, oppure se è necessario aggiungere un ulteriore dissipatore.

Una valutazione errata può avere un grande impatto sull'affidabilità dell'alimentatore.

⁴ Field-Effect-Transistor

ESEMPIO ESEMPLIFICATIVO

Efficienza = potenza d'uscita / potenza d'ingresso pertanto:

$$\text{potenza d'uscita} / \text{potenza d'ingresso} = 0,9$$

Se la potenza d'uscita è 400 W, dalla relazione precedente troviamo che:

$$\text{potenza d'ingresso} = 400/0,9 = 444,5 \text{ W.}$$

In conclusione, $444,5 - 400 = 44,5$ W devono essere dissipati (smaltiti) sotto forma di calore.

Il progetto dell'alimentatore stesso può avere un impatto significativo sull'intero progetto di un sistema raffreddato a piastra. Ovviamente il fatto che l'alimentatore abbia la massima efficienza aiuta e, dal momento che il calore prodotto è inversamente proporzionale all'efficienza, più alta è l'efficienza, più piccolo può essere il dissipatore. Da un altro punto di vista, mantenendo lo stesso dissipatore e aumentando l'efficienza dell'alimentatore, la temperatura all'interno del contenitore diminuisce, cosa che può aumentare l'aspettativa di vita dell'alimentatore (secondo una regola empirica, riducendo di 10°C la temperatura ambiente si raddoppia la vita di un condensatore).

Si può quindi concludere che la temperatura interna dell'involucro è il maggiore determinante della vita di un alimentatore e che il calore prodotto viene confinato all'interno dello stesso.

4.1.5. Trasformatori

Determinazione della produzione di calore nei Trasformatori

Come gli alimentatori, anche i Trasformatori non potranno mai essere "ideali", ognuno dovrà sostenere una certa perdita di energia, soprattutto quella che viene convertita in calore. Calore prodotto solo dai componenti interni agli stessi (effetto Joule), in particolare gli avvolgimenti e il nucleo sono le fonti principali. Il calore generato dovrà necessariamente essere dissipato tramite ventilazione forzata nel caso di collocazione all'interno di un rack.

Lo studio del problema termico può essere suddiviso in due parti:

- Generazione del calore;
- Trasmissione del calore;

- Generazione del Calore

In una macchina elettrica si genera calore a seguito delle *perdite* che si manifestano in essa durante il suo funzionamento, in cui le principali sono:

PERDITE NEL FERRO

Nei nuclei magnetici delle macchine elettriche si hanno perdite di potenza attiva dovute a:

- 1) *Isteresi magnetica*⁵
- 2) *Correnti parassite*⁶

Entrambi i fenomeni sono legati alla variabilità nel tempo del flusso magnetico. Sono dette perdite nel ferro, in quanto i nuclei magnetici sono costituiti da leghe di ferro. Nel caso di flusso magnetico costante tali perdite sono nulle.

- Trasmissione del Calore

La trasmissione del calore nelle macchine elettriche avviene secondo le tre tipiche forme:

- *Trasmissione per Conduzione;*

Essa avviene senza alcun movimento di materia, ed è il caso tipico della trasmissione del calore fra due superfici di un corpo solido. Nelle macchine elettriche tale tipo di trasmissione del calore si ha all'interno dei materiali attivi (avvolgimenti e nuclei magnetici).

- *Trasmissione per Convezione;*

Essa avviene con movimento di materia all'esterno delle sorgenti termiche: in tal caso il calore si propaga perché le parti del fluido caldo si spostano verso zone di fluido freddo mescolandosi e sostituendosi ad esso.

- *Trasmissione per Irraggiamento.*

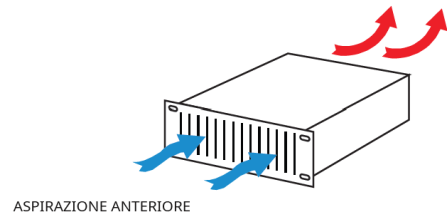
Avviene in generale dalle pareti dei corpi solidi all'aria circostante senza movimento di materia (può avvenire anche nel vuoto). È una forma di trasmissione del calore sotto forma di onde elettromagnetiche le quali, colpendo un corpo, trasformano la propria energia in calore.

⁵ Il fenomeno dell'isteresi magnetica si manifesta quando un nucleo di materiale ferromagnetico è sottoposto a magnetizzazione ciclica alternativa; a causa del fenomeno dell'isteresi magnetica, l'energia fornita al nucleo durante la fase di magnetizzazione non viene interamente restituita durante quella di smagnetizzazione, ma, ad ogni ciclo, rimane immagazzinata nel nucleo magnetico una parte di essa.

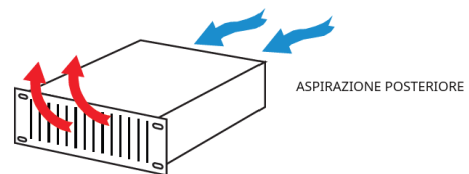
⁶ Le correnti indotte parassite nascono nei corpi conduttori come conseguenza della legge di Faraday relativa al fenomeno dell'induzione magnetica.

4.2. Flusso d'aria dei componenti, Progettazione dell'alloggiamento e dissipazione per irraggiamento

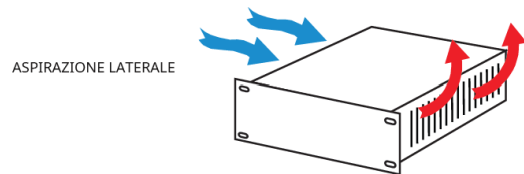
Le apparecchiature con prese d'aria anteriori e scarico posteriore richiedono un flusso d'aria nella parte anteriore dell'armadio. In questi casi la raccomandazione è di non includere nella struttura del rack la porta anteriore o, in alternativa, dove la sicurezza o l'estetica sono un problema, dovrebbero essere utilizzate porte ventilate (almeno il 64% dell'apertura).

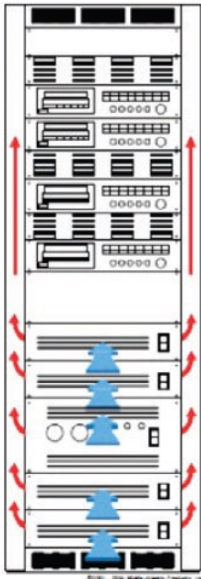


Devono essere presi in considerazione anche i dispositivi con prese posteriori e scarico anteriore. In questi casi deve esserci un modo per far entrare l'aria dalla parte posteriore dell'armadio per poi sfiatare nella parte anteriore. Anche in questo caso si sconsiglia la presenza della porta anteriore o se necessario con apertura > 64%.



I componenti che hanno prese d'aria e/o scarichi sui lati, inclusi molti Switch, richiedono ulteriori considerazioni per garantire una corretta gestione termica. Gli involucri più larghi forniscono più spazio per il flusso d'aria nel lato, che può quindi essere instradato tramite una diga d'aria per scaricare attraverso la parte posteriore.





È necessaria inoltre, un'altra considerazione per le installazioni con più armadi per garantire che l'aria calda non viaggi da un armadio all'altro; in questi casi sono efficaci le dighe d'aria, che a volte sono sotto forma di pannelli laterali tra i rack.

Molti sistemi possono avere un mix di prese e scarichi anteriori, posteriori e laterali. In questi casi è necessaria un'attenta pianificazione per garantire che l'aria di scarico calda non venga indirizzata verso le prese di aspirazione degli'altri componenti per garantire la longevità del sistema.

Per le applicazioni di convezione passiva (senza ventola), sono utili involucri più larghi. Un "Effetto Camino" convettivo è reso possibile dallo spazio tra i lati dell'apparecchiatura montata e i lati dell'armadio. La presenza di questi spazi facilita il prelievo di calore verso l'alto.

Nelle applicazioni di ventilazione attiva (ad aria forzata), è possibile selezionare un involucro più stretto per risparmiare spazio sul pavimento. In questo caso, il modo migliore per scaricare l'aria è incorporare un ventilatore. Quando sono necessarie ventole con montaggio superiore, è necessario selezionare un involucro senza sfiato integrato nella parte superiore.

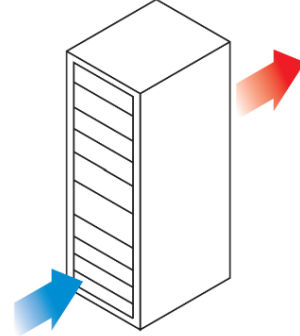
- **Dissipazione Irradiata**

Gli armadi non ventilati dissipano il calore interno verso l'esterno anche per irraggiamento. All'aumentare della temperatura interna, aumenta anche la temperatura dell'involucro in lamiera. Questo calore verrà quindi irradiato nell'ambiente circostante. È importante notare che, poiché il legno è un isolante, le apparecchiature montate all'interno di armadi e mobili di legno non trarranno vantaggio dalla dissipazione del calore per irraggiamento.

4.3. Flusso d'aria all'interno degli alloggiamenti

Una corretta pianificazione del percorso dell'aria di raffreddamento all'interno di un armadio assicura che non si creino punti caldi e che il calore prodotto dalle apparecchiature venga efficacemente rimosso.

Il flusso d'aria più comune nelle apparecchiature è quello nel quale l'aria fresca viene aspirata nella parte anteriore per poi venire espulsa posteriormente o lateralmente

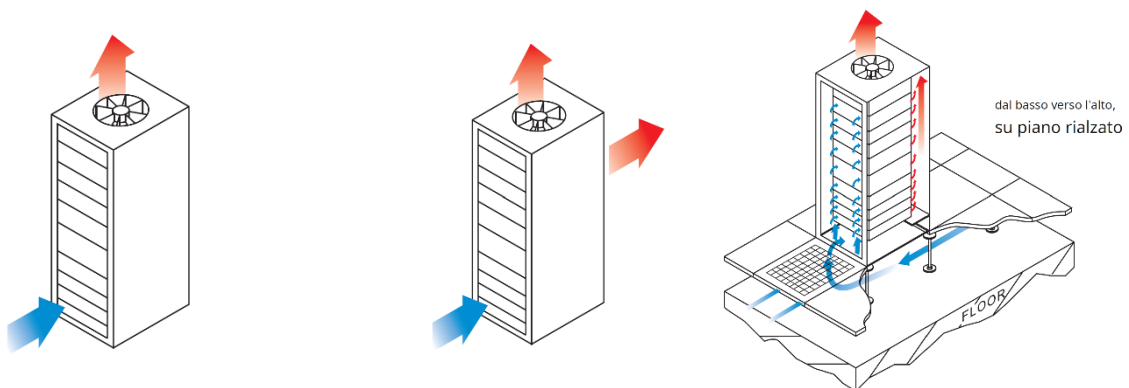


Ci sono alcuni prodotti invece che hanno prese di immissione dell'aria fresca nella parte posteriore (rear-intake) per poi scaricarla nella parte anteriore. Questo presenta alcune sfide di progettazione, in quanto non consente all'aria calda di uscire dalla parte superiore dell'involucro. Le ventole nella parte superiore dovranno spingere l'aria verso il basso quando si utilizzano queste tipologie di device.

Alcune apparecchiature di rete (Switch) invece trasporteranno l'aria da un lato all'altro, operazione che in genere viene definita *respirazione laterale*. Questo non si trova presso in un apparecchiatura AV ma, come già detto in precedenza, su dispositivi di rete come gli Switch. In questo caso bisognerà prestare attenzione alla progettazione per garantire che venga fornito un flusso d'aria adeguato.

I flussi d'aria verso il basso possono essere tutt'altro che ideali, creando "convezione mista" (miscela di aria forzata e convezione) durante il funzionamento o in caso di rottura del ventilatore. Tuttavia, con la corretta applicazione dei principi di progettazione termica, questi sistemi possono funzionare senza problemi.

PRINCIPALI TIPOLOGIE DI FLUSSI D'ARIA



4.3.1. Studio del flusso d'aria: Passivo (Convezione)

In un ambiente a temperatura normale, un armadio è in grado di dissipare da 300 a 500 Watt di calore (non Watt "audio") per convezione naturale. Ciò richiede adeguate aperture di sfiato nella parte inferiore e superiore dell'armadio (nessuna nel mezzo per un "effetto camino" efficace) e un flusso d'aria senza ostacoli all'interno. Il principale vantaggio della convezione naturale è la sua affidabilità intrinseca.

Il movimento dell'aria in un armadio opportunamente configurato è generato da gradienti termici.

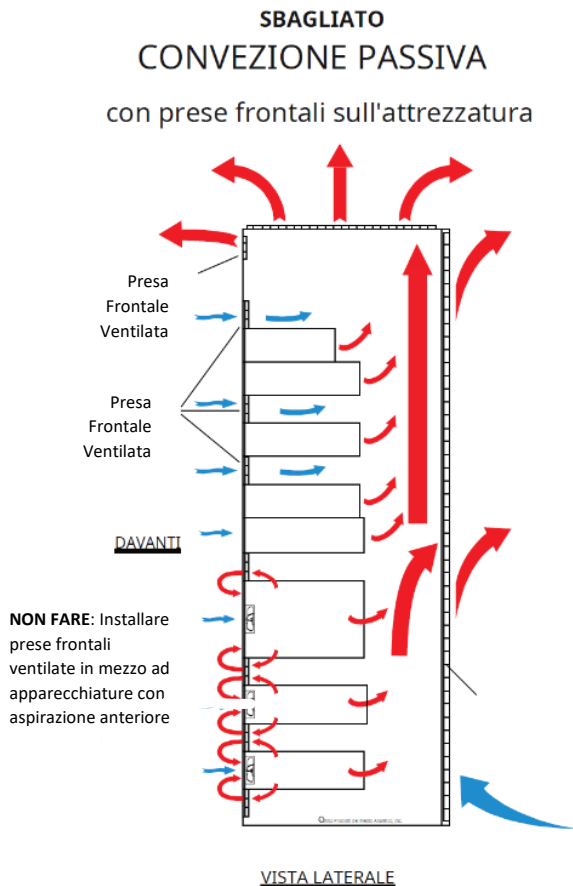
La configurazione corretta include soprattutto l'ottimizzazione del posizionamento dei componenti:

Le apparecchiature più calde, come gli amplificatori, se situate alla base dell'armadio forniranno un flusso d'aria naturale maggiore.

Quando si utilizza la convezione passiva a temperature ambiente elevate (30/32 °C), i componenti che generano più calore devono essere posizionati vicino alla parte superiore dell'armadio, stando attenti però in fase di trasporto o se ci si trova in zona sismica (rischio ribaltamento).

Il calcolo dei flussi d'aria in un rack a convezione passiva è abbastanza complicato; la bassa velocità del flusso rende quasi impossibile la misurazione, e i test del fumo mostrano che l'aria può entrare ed uscire dalla stessa presa d'aria.

Le apparecchiature che sfiatano passivamente (senza ventole) a volte hanno prese d'aria nella parte inferiore o superiore, quindi è necessario prestare attenzione a non bloccarle con altre apparecchiature impilate direttamente l'una sull'altra. In caso contrario, è accettabile impilare le apparecchiature direttamente una sopra l'altra.



In questo esempio, le apparecchiature con presa d'aria frontale fanno ricircolare l'aria perché ci sono delle aperture tra i componenti

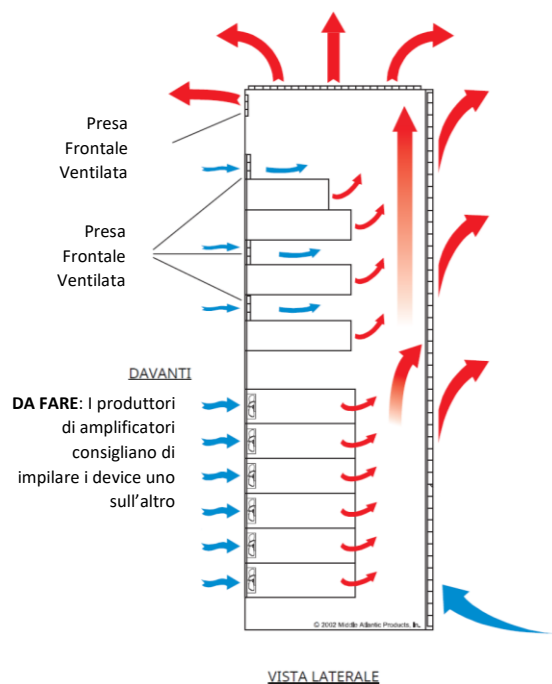
ERRORE COMUNE:

Molte volte gli installatori mettono semplicemente degli sfiati tra ogni apparecchiatura, senza considerare il ricircolo dell'aria calda. Questo può "cortocircuitare" il flusso d'aria perché le prese d'aria sono posizionate troppo vicino alle fonti di calore.

Buone strategie di flusso d'aria rompono le aree di stratificazione che causano gli "hot spots". Per le apparecchiature con ingresso frontale, è perfettamente accettabile riparmiare spazio nell'armadio impilando le apparecchiature una sopra l'altra, purché non dispongano di prese d'aria nella parte superiore o inferiore.

CORRETTO
CONVEZIONE PASSIVA

con prese frontali sull'attrezzatura



Maggiore è la produzione di calore, maggiore sarà il flusso d'aria per effetto della convezione naturale.
È sempre meglio un'area più aperta, sotto forma di fessure o perforazioni.

Una porta posteriore completamente ventilata consente all'aria più calda di fuoriuscire dall'armadio in modo più efficace

È consigliabile scegliere armadi con prese d'aria integrate nella parte anteriore (superiore e inferiore) e assicurarsi che sia installata un'opzione superiore completamente aperta.

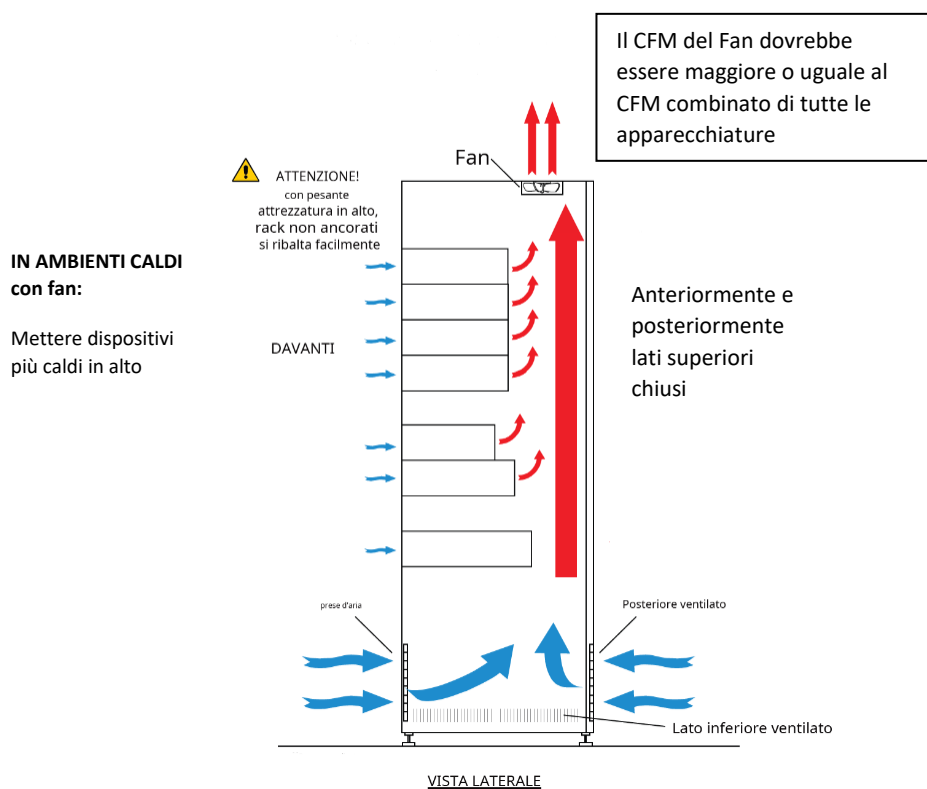
L'installazione di un pannello posteriore ventilato in uno scenario di raffreddamento passivo non è necessariamente richiesto; dipende dai BTU/h totali all'interno del rack.

4.3.2. Studio del flusso d'aria: Aria Forzata (Active Thermal Management)

Quando ci sono troppi BTU/h, affinché la convezione assorba adeguatamente il calore, è essenziale forzare l'aria fuori dall'armadio. La gestione termica attiva prevede l'uso di ventole per rimuovere efficacemente il calore dall'involucro.

La maggior parte dei ventilatori delle apparecchiature ad aspirazione frontale ha un valore compreso tra 25 e 50 CFM ciascuno. Se si rende necessaria l'aggiunta di una ventola in aspirazione sulla parte superiore del rack, bisogna assicurarsi che questa sia almeno la somma di tutti i CFM degli elementi presenti all'interno. Se questo principio viene rispettato, l'aria calda non andrà in "cortocircuito" venendo così estratta dalla ventola in sommità del rack.

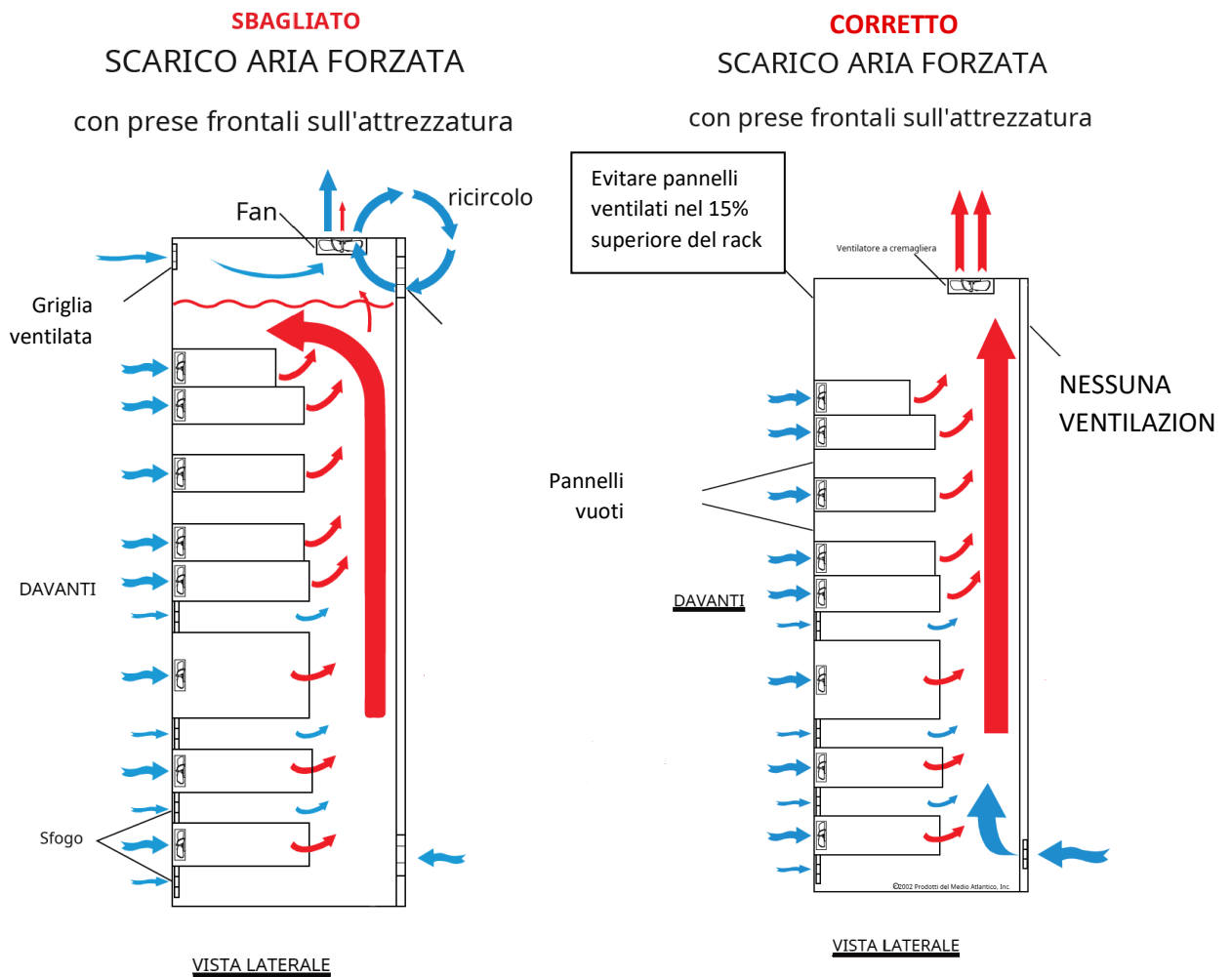
Per queste situazioni si consiglia uno sportello posteriore chiuso con uno sfiato sul fondo per far sì che l'aria fresca riesca ad entrare sia da davanti che da dietro l'armadio. Laddove è richiesta aria forzata, è accettabile (ma non essenziale) inserire prese d'aria tra le apparecchiature con prese frontali.



Si noti che nelle figure sovrastanti non sono presenti prese d'aria nella parte superiore dell'armadio, né anteriore e né posteriore; questo impedirà il "cortocircuito" dell'aria nella parte superiore del rack.

Active Thermal Management:

Esempio di Cortocircuito d'aria:



PROBLEMA: le ventole aspirano aria più fredda dalle aperture superiori dell'armadio invece di aspirare aria calda dall'interno dell'armadio.

SOLUZIONE: Mantenere l'aria in ingresso e in uscita distanti. Evitare i pannelli ventilati nel 15% della parte superiore del rack.

4.3.3. Filtri e contenitori Pressurizzati

Il filtraggio aiuta a proteggere le apparecchiature digitali e altre apparecchiature sensibili dall' "hygroscopic dust failure", che si verifica in ambienti umidi (generalmente 65% di umidità relativa o superiore). La polvere assorbe l'umidità e si deposita sui circuiti stampati.



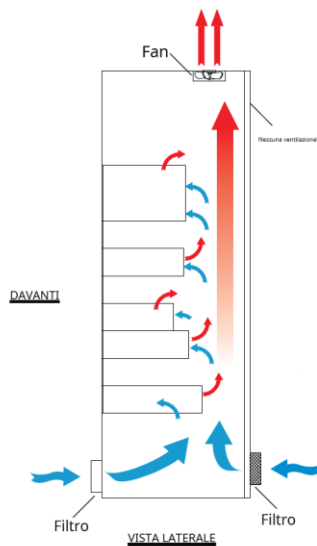
Dei buoni filtri dovrebbero essere lavabili, avere una lunga durata e una bassa caduta di pressione. I filtri estremamente sporchi si comportano come pannelli ciechi e fanno aumentare pericolosamente le temperature all'interno dell'armadio.

È consigliabile non utilizzare i filtri, a meno che l'ambiente non li richieda nello specifico e sia previsto un piano di manutenzione efficace.

- **Contenitori Pressurizzati**

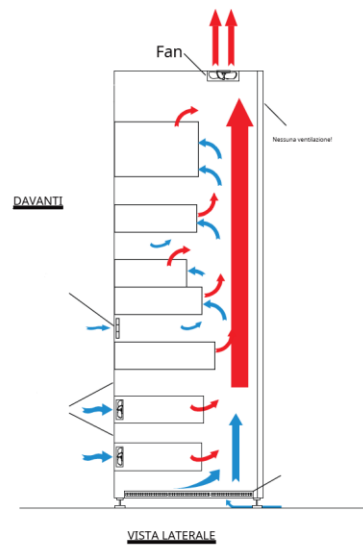
CORRETTO
ARIA FORZATA FILTRATA,
SCARICO

senza prese frontali
sull'attrezzatura



CORRETTO
ARIA FORZATA FILTRATA,
SCARICO

con e senza prese frontali
sull'attrezzatura



La soluzione migliore per ambienti polverosi o sporchi in cui i filtri devono essere cambiati regolarmente è quella di pressurizzare l'involucro, piuttosto che aspirare l'aria dalla parte superiore.

Sebbene meno efficiente dal punto di vista termico, la pressurizzazione garantisce che l'aria pulita entri attraverso punti prestabiliti che garantiscono il filtraggio di polvere ed altre sostanze dannose per i componenti elettrici, uscendo poi dall'involucro dalla parte superiore.

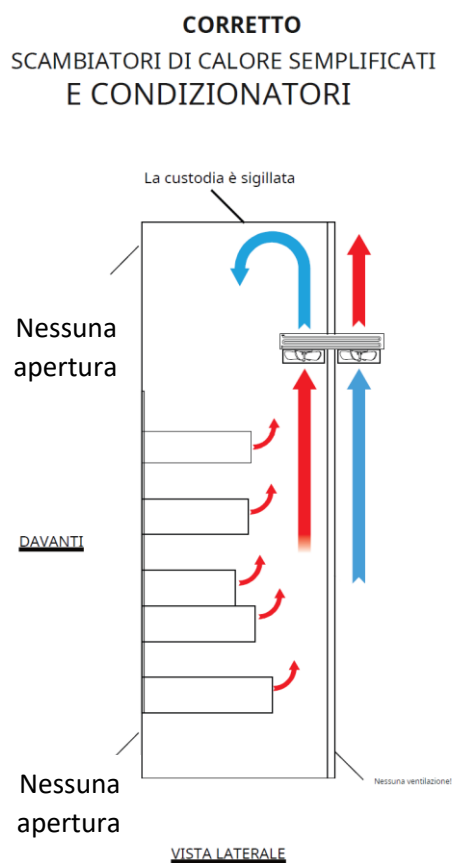
4.3.4. Scambiatori di calore & Aria Condizionata

In ambienti molto difficili come pavimenti delle fabbriche, i filtri si intasano rapidamente e il calore all'interno dell'armadio si accumulerà rapidamente. In queste situazioni andranno installati degli armadi classificati NEMA (National Electrical Manufacturers Assosation) dotati di guarnizioni sigillate.

Gli scambiatori di calore e le unità di condizionamento dell'aria (per lo più installati in armadi NEMA) non consentono all'aria sporca dell'ambiente di mescolarsi con l'aria interna del rack, il che garantisce che l'aria interna rimanga pulita.

questi dispositivi (sia a batteria d'acqua che con refrigerante) sono anche l'unico modo per rendere la temperatura all'interno dell'armadio più bassa dell'aria ambiente. Prestare attenzione alla formazione di condensa durante il raffreddamento dell'armadio.

I pericoli di condensa vengono superati assicurando che la temperatura dell'aria sia al di sopra del punto di rugiada.



5. METODOLOGIA

Introduzione

L'obiettivo principale di questa ricerca è stato quello di valutare e migliorare il sistema di raffreddamento dell'equipaggiamento AV-IT all'interno della navetta 33.21, attraverso un approccio integrato di attività sperimentali e analitiche.

Questo lavoro è stato motivato dalla necessità di risolvere i problemi legati al riscaldamento degli apparecchi AV-IT che possono causare malfunzionamenti, danneggiamenti o addirittura interruzione dei servizi a bordo.

Per raggiungere questo obiettivo, sono state condotte attività sperimentali all'interno dello yacht al fine di raccogliere dati sulle temperature e i flussi d'aria degli apparecchi e delle relative condizioni ambientali. Inoltre, è stata effettuata una simulazione numerica utilizzando modelli termici al fine di analizzare il sistema di raffreddamento esistente e valutare l'impatto di eventuali miglioramenti. La combinazione di queste attività ha permesso di sviluppare soluzioni efficaci per migliorare la gestione termica dell'equipaggiamento AV-IT a bordo.

In questo capitolo verranno descritte in dettaglio le attività sperimentali e analitiche condotte e i relativi risultati ottenuti.

5.1. Attività Sperimentali - Studio e descrizione del Main Rack della navetta 33.21

5.1.1. Posizione del Main Rack

Il Rack in questione è il Main Rack della navetta 33.21, atto alla gestione AV-IT delle apparecchiature del Main deck.

In **Figura 1 e 2** viene identificata la posizione del Main Rack all'interno dell'opera morta della navetta 33.21.

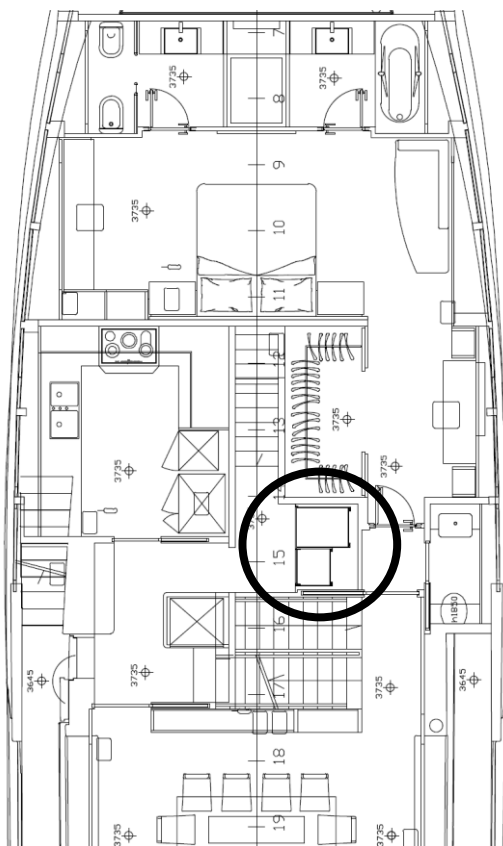


Figura 4 - Pianta Main Deck

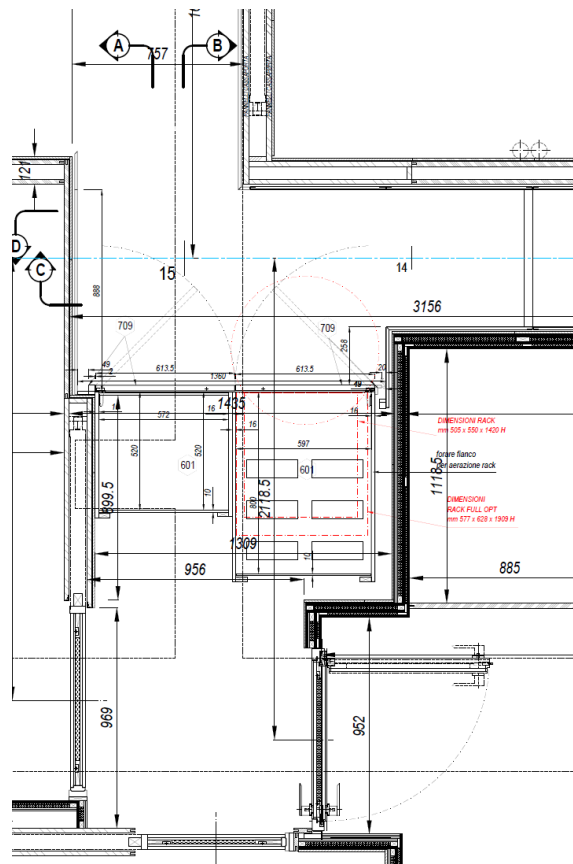


Figura 5 - Particolare posizionamento Rack

Dalle note di Fig 2, il progettista ha previsto dei fori laterali e posteriori per l'aerazione del vano rack. Il flusso d'aria viene quindi incanalato nello spazio presente tra il mobile rack e la pannellatura esterna.

5.1.2. Schema di condizionamento

Inoltre, è stato possibile reperire dal cantiere navale lo schema dell'impianto di condizionamento dell'intera imbarcazione.

Com'è possibile notare in **Fig. 3**, è presente una bocchetta di condizionamento posizionata di fronte all'armadio contenente il rack VW; le bocchette di mandata sono posizionate in alto, come disposizione del progettista, con diametro pari a 100 Ø. In questo modo la temperatura ambiente dell'intera zona è fisata sui $20 \pm 2^\circ\text{C}$.

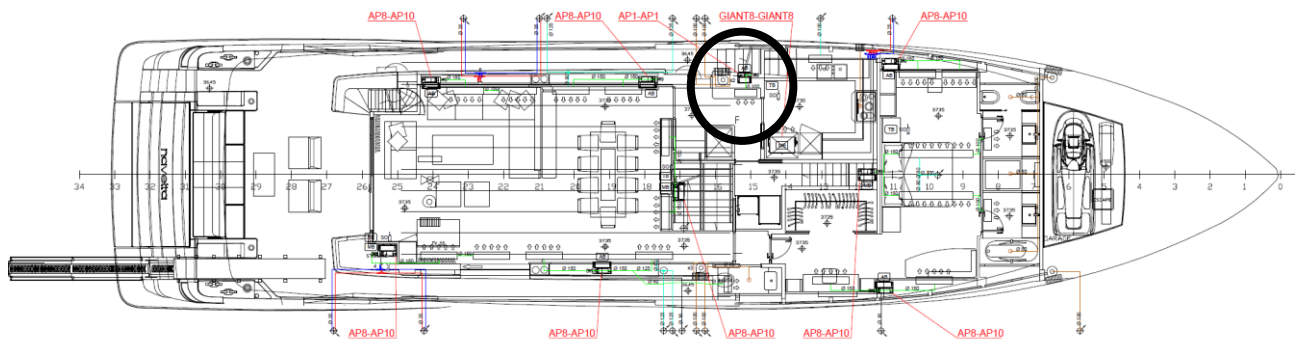


Figura 6 - Posizionamento bocchette di condizionamento

5.1.3. Caratteristiche Rack

5.1.3.1. Involucro esterno, materiali e dimensioni

Il materiale che circonda la struttura del rack è compensato navale, le principali caratteristiche sono l'isolamento termo-acustico e la leggerezza.

Le dimensioni dell'armadio esterno sono di 190 x 60 cm e le relative griglie di aspirazione superiori e inferiori, mostrate in Fig 4, hanno dimensioni 13 x 50 cm



Figura 7 - Bocchette di aerazione Rack

5.1.3.2. Tipologia e dimensioni dei pannelli Rack

La ditta fornitrice dei Rack è la Middle Atlantic, le caratteristiche dimensionali e materiali sono:

- Il rack è composto interamente in acciaio (montanti e supporti device);
- La distanza tra le lastre di supporto per i vari device è di 8,85 cm;
- Lo spessore delle lastre di supporto device è pari a 1,7 mm;
- Sono presenti delle aperture per facilitare la ventilazione alla base di queste lastre di supporto (N°23 x 5 fessure da 1mm x 5 cm)
- Non sono presenti pannelli laterali di chiusura, il rack viene inserito in una nicchia di legno ricavata appositamente
- Presenta un struttura che permette l'estrazione e la rotazione dell'intero rack di 90° per consentire la manutenzione



Figura 8 - Particolari costruttivi Main Rack

5.1.4. Schema di funzionamento, sezioni e prospetti

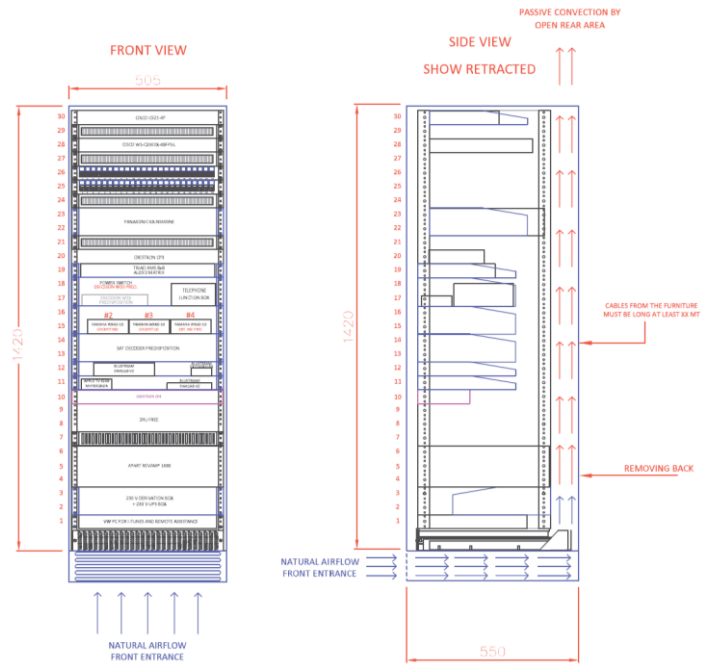


Figura 9 - Prospetto e Sezione Main Rack

Com'è possibile osservare dal prospetto e dalla sezione, la ventilazione è naturale, il flusso d'aria entra nella parte inferiore del rack e, per effetto camino, risale tutta la struttura portando via calore dalla parte posteriore e laterale, indirizzandolo nel vano superiore dov'è posizionato un ventilatore centrifugo raffigurato in Fig. 7-8 che lavora in aspirazione.

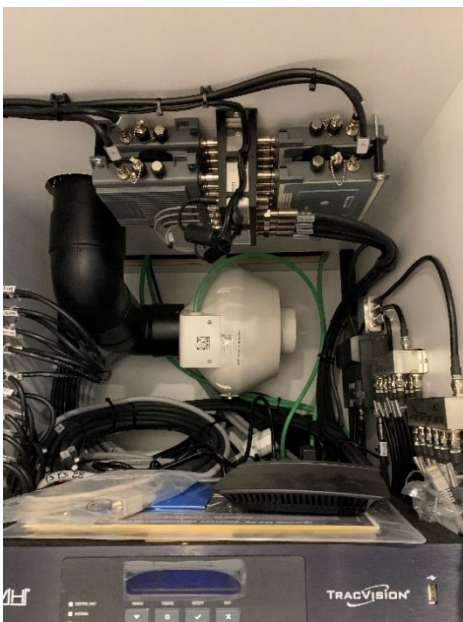


Figura 10 - Aspiratore centrifugo della navetta 33.21

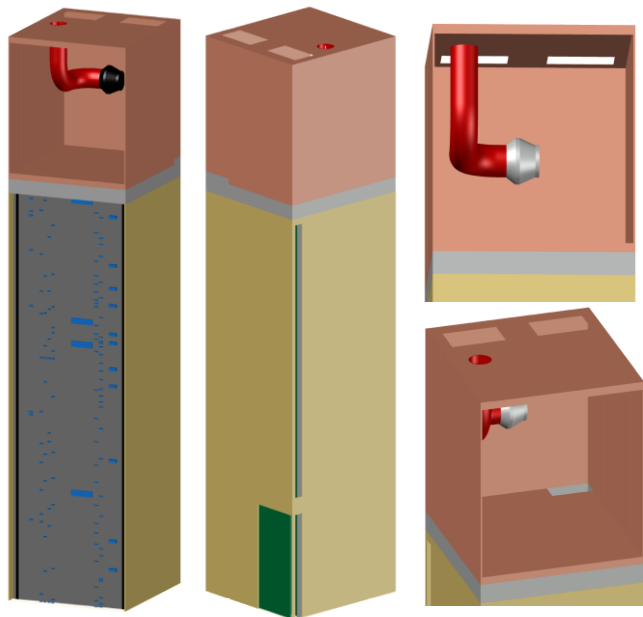


Figura 11 - Modello 3D dell'intero vano Rack

Come è possibile osservare in **Figura 8**, non sono presenti ventole in aspirazione o in immissione per quanto riguarda il Rack, sono di facile visione le aperture posteriori e laterali dell'involucro dai quali l'aria calda proveniente dalle apparecchiature viene espulsa; c'è anche una fessura che rende comunicanti il vano Rack con quello superiore dove è posizionato l'aspiratore centrifugo.

Le aperture presenti sull'involucro hanno misure:

- Apertura posteriore: 200 x 370 [mm]
- Aperture laterali: 50 x 370 [mm] ; 50 x 970 [mm]
- Apertura vano Rack/Aspirazione: 55 x 130 [mm]

5.1.5. Caratteristiche dell'aspiratore

La bocchetta di aspirazione ha un diametro \varnothing di 70mm; di seguito la scheda tecnica dell'aspiratore.

Corrente max assorbita alla max vel. (A)	0,22	Tensione (V)	220-240
Corrente max assorbita alla min vel. (A)	0,14	Portata max alla max vel. (l/s)	69,7
Diametro Nominale Condotto (mm)	100	Portata max alla max vel. (m ³ /h)	251
Frequenza (Hz)	50	Portata max alla min vel. (l/s)	24
Grado Protezione IP	X4	Portata max alla min vel. (m ³ /h)	85
Isolamento	II° classe	Pressione max alla max vel. (mmH2O)	37
\varnothing Scarico (mm)	97	Pressione max alla max vel. (Pa)	366
Peso (Kg)	2,4	Pressione max alla min vel. (mmH2O)	27
Potenza assorbita max (W)	50	Pressione max alla min vel. (Pa)	269
Potenza max assorbita alla min vel. (W)	14	Pressione sonora Lp [dB (A)] 3m - max vel	56
Temp. ambiente max funzionamento continuativo (°C)	50	RPM max	2400

5.2. Analisi Sperimentale

Per la sperimentazione, il giorno 26 luglio 2021, l'intero sistema AV-IT della navetta 33.21 è stato acceso due ore prima dell'inizio delle prove per arrivare ad un regime di temperatura stabile (in idle mode).

Per simulare le normali situazioni di utilizzo, nel momento in cui la prova è stata avviata, il sistema è stato messo online (quindi sotto carico).

Per i rilevamenti sono state utilizzate tre sonde di temperatura a bulbo secco, posizionate nei punti più rilevanti secondo gli schemi di flusso forniti dall'azienda costruttrice.

La rilevazione ha avuto una durata di circa 2 ore e 30 minuti con intervalli di acquisizione di 30 secondi, durante la quale è stato possibile avere indicazione sull'andamento delle temperature all'interno del vano Rack; infatti, la prova è stata interrotta quando le temperature delle tre sonde si sono stabilizzate.

5.2.1. Posizionamento delle sonde

- Posizione Sonda N°1

La sonda è stata posizionata a metà dell'altezza del Rack e sulla parte destra, com'è possibile vedere in **Figura 9**.

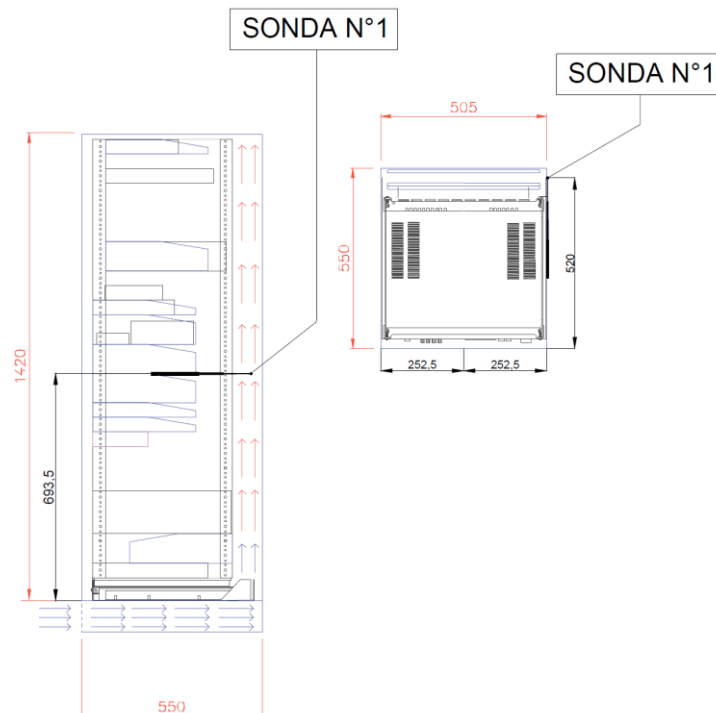


Figura 12 - Posizione sonda 1 all'interno del vano rack

- Posizione Sonda N°2

La sonda è stata posizionata centralmente sul tetto della struttura Rack, com'è possibile vedere in **Figura 10**.

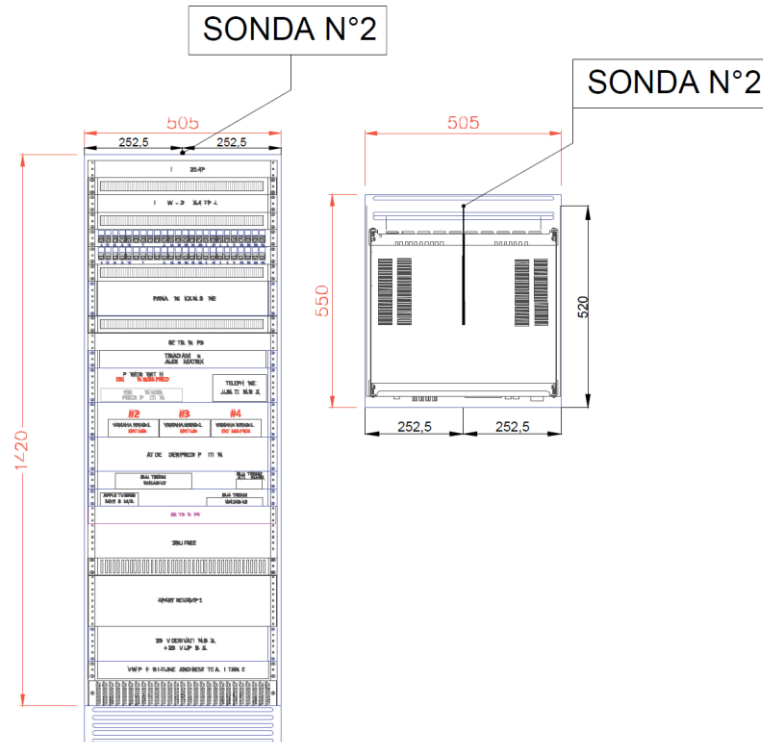


Figura 13 - Posizione sonda 2 all'interno del vano rack

- Posizione Sonda N°3

La terza ed ultima sonda in questo caso è stata posta all'esterno del vano contenente il rack, è stata infatti posizionata nel vano superiore, a 5 mm dal punto centrale della bocchetta di aspirazione dell'aspiratore centrifugo, com'è possibile vedere in **Figura 11**.

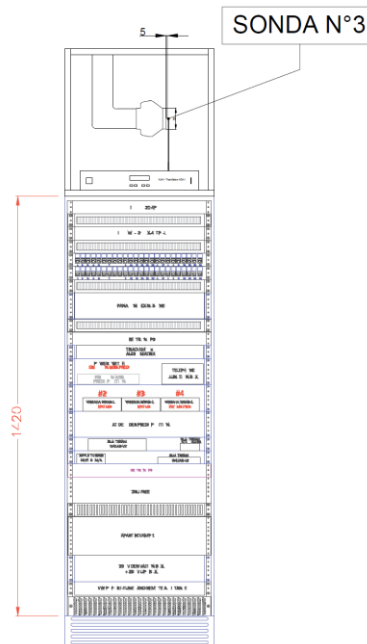


Figura 14 – Posizione sonda 3 all'esterno del vano Rack

5.3. Analisi dei Dati

Come appena descritto nel capitolo precedente, la prova è stata effettuata simulando una situazione di pieno carico del sistema dopo che quest'ultimo è stato lasciato in idle per circa due ore, in modo tale che si partisse da un regime di temperatura stabile.

Dopo aver effettuato le misurazioni di temperatura e velocità dell'aria mediante le sonde a bulbo secco e anemometri, i dati sono stati riportati su un foglio Excel. In questo modo è stato possibile organizzare e analizzare i dati in maniera efficiente.

Successivamente, i dati sono stati graficati per valutare l'andamento della temperatura e della velocità dell'aria all'interno dell'involucro rack. In particolare, si è confrontato l'andamento della temperatura e dalla velocità dell'aria registrate dalle tre diverse sonde posizionate all'interno del vano.

- I dati sono relativi alle temperature e alla velocità dell'aria all'interno dell'involucro Rack/aspiratore.

Nell'analisi dei dati relativi alle rilevazioni di temperatura e velocità dell'aria della *sonda 1* [Grafico 1], quella posizionata a metà dell'altezza del rack, è possibile osservare che, mentre la velocità dell'aria rimane stabile sui valori di circa 0,12 – 0,15 [m/s], la temperatura, dopo circa 40 minuti inizia a crescere, da circa 22,5 °C fino a stabilizzarsi sui 24,5 °C.

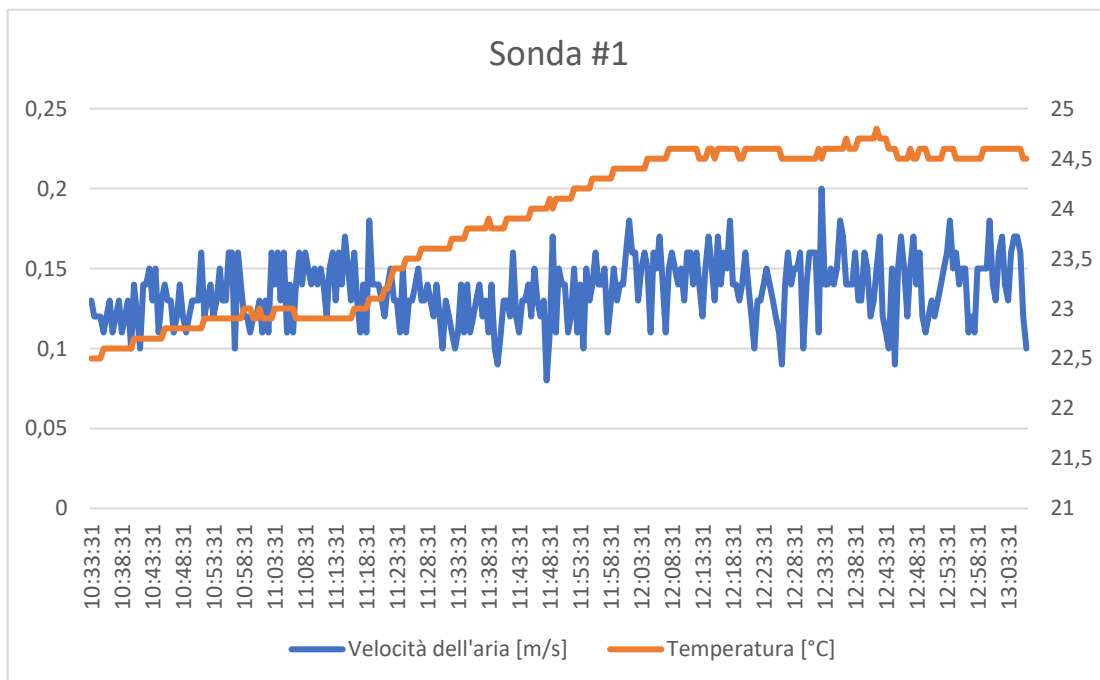


Grafico 1 – Sonda#1 - Temperatura/Velocità dell'Aria

Nell'analisi dei dati di temperatura e velocità dell'aria della *sonda 2* [**Grafico 2**] , quella posizionata sul tetto del rack, è possibile osservare che, il grafico della velocità dell'aria dopo circa 45 minuti dall'inizio della prova ha iniziato ad avere dei picchi e a fluttuare, alcuni dei quali anche molto elevati, come quello che va dall'intervallo di tempo delle 12:10:56 alle 12:14:56.

Per quanto riguarda l'andamento della temperatura, esso risulta sempre crescente, partendo da un valore di circa 24,7 °C fino ad arrivare a 29.7°C; dall'andamento del grafico si presume che la temperatura avrebbe potuto continuare ad aumentare, ma per via del limitato tempo concesso all'interno dell'imbarcazione la prova è stata interrotta alle 13:06.

Grafico 2.

Mettendo a paragone la temperatura del *Grafico 1* e la velocità dell'aria del *Grafico 2* è possibile osservare un'interessante correlazione tra i due; infatti, all'aumento della temperatura della parte inferiore dovuto ai carichi di lavoro imposti alle apparecchiature, la velocità dell'aria nella parte superiore è passata da un regime lineare e stabile ad uno di instabilità e caratterizzato da picchi.

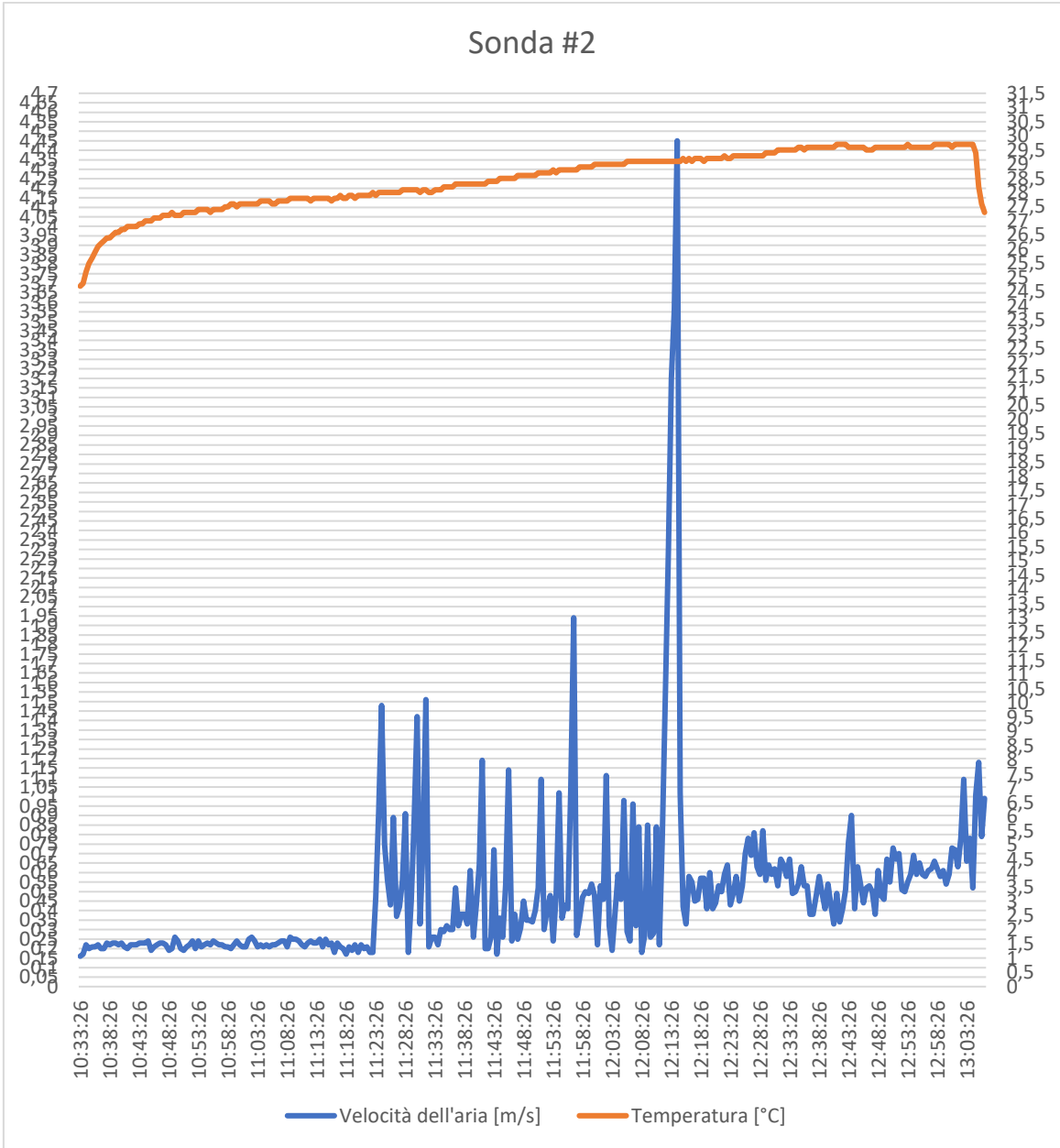


Grafico 2 – Sonda#2 - Temperatura/Velocità dell'Aria

Per quanto riguarda la *sonda numero 3* [Grafico 3], posizionata all’imbocco dell’aspiratore centrifugo è possibile osservare come il grafico della temperatura sia in costante crescita per l’intera durata della prova, dati che combaciano con i risultati ottenuti dalla *sonda 2*. Di fatto, come illustrato nei precedenti capitoli, il vano rack e il vano dell’aspiratore sono comunicanti tramite delle fessure laterali, superiori e interne allo stesso vano. [Fig. 8]

Per quanto riguarda la velocità dell’aria, si può notare un leggero decremento dopo circa 50 minuti dall’inizio della prova fino a valori di circa 1,4 m/s, per poi stabilizzarsi su 1,45 e 1,50 m/s fino al termine della sperimentazione.

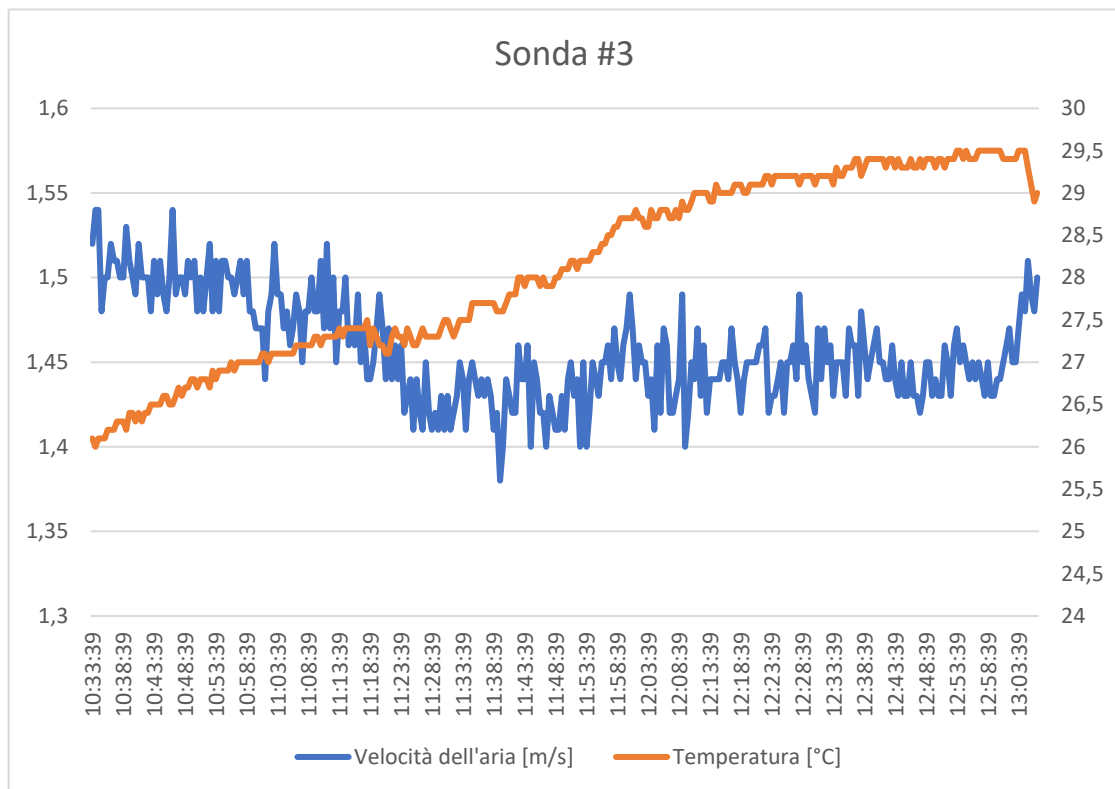


Grafico 3 – Sonda#3 - Temperatura/Velocità dell’Aria

- Gli stessi dati sono stati utilizzati anche per graficare le distribuzioni di temperatura rilevate dalle tre sonde.

Per quanto riguarda la sonda 1, collocata lateralmente e a metà dell'altezza del rack, la distribuzione di temperatura si attesta su valori di concentrazione crescenti a partire da circa 23°C fino a 24°C. **[Grafico 4]**

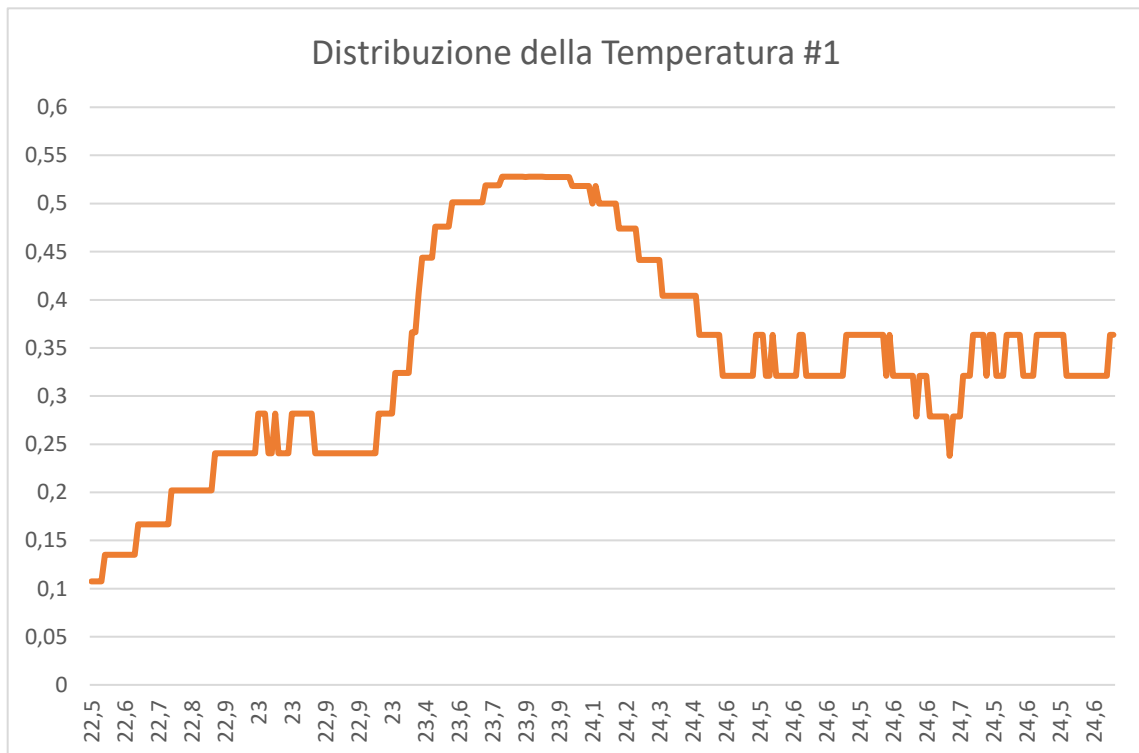


Grafico 4 – Sonda#1 – Distribuzione temperatura

La sonda 2, posizionata sul tetto del rack, ha registrato valori di concentrazione al picco di distribuzione che variano nell'intervallo di temperatura di 27,5°C e 29°C. [Grafico 5]

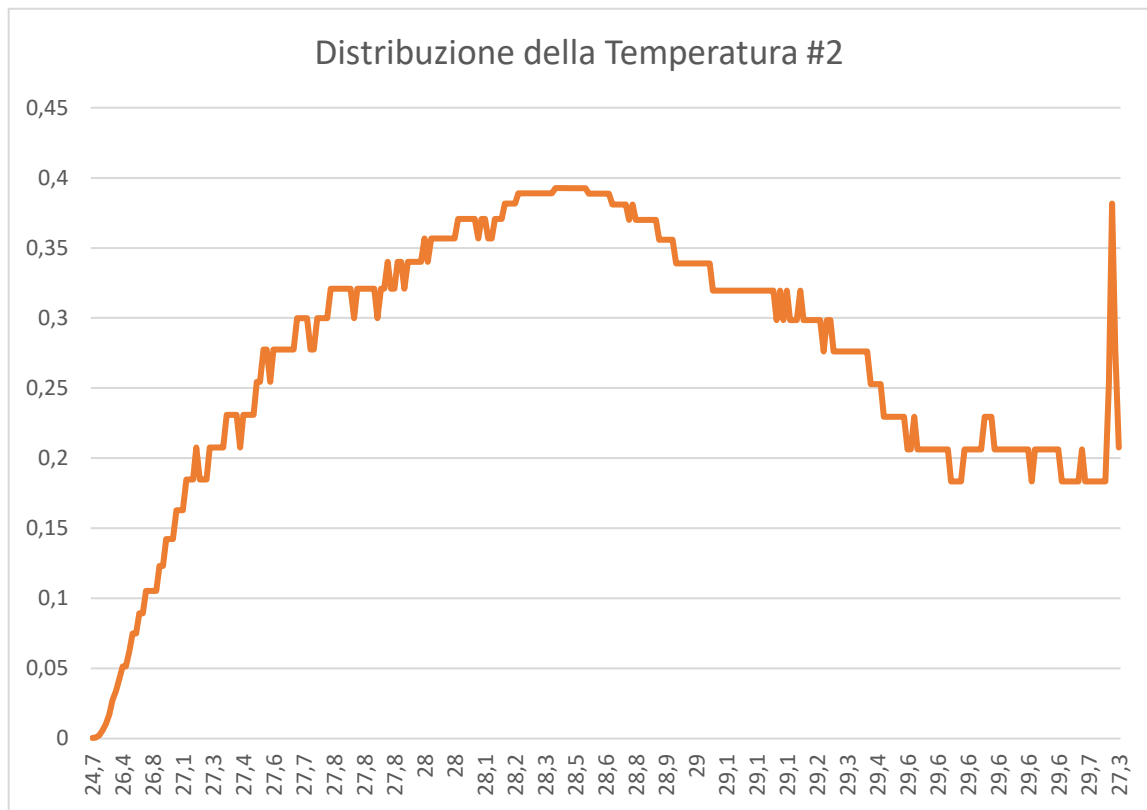


Grafico 5 – Sonda#2 – Distribuzione temperatura

Nel caso della sonda 3, posizionata all'imbocco dell'aspiratore centrifugo, la distribuzione di temperatura si concentra tra valori di 27°C e 29°C. **[Grafico 6]**

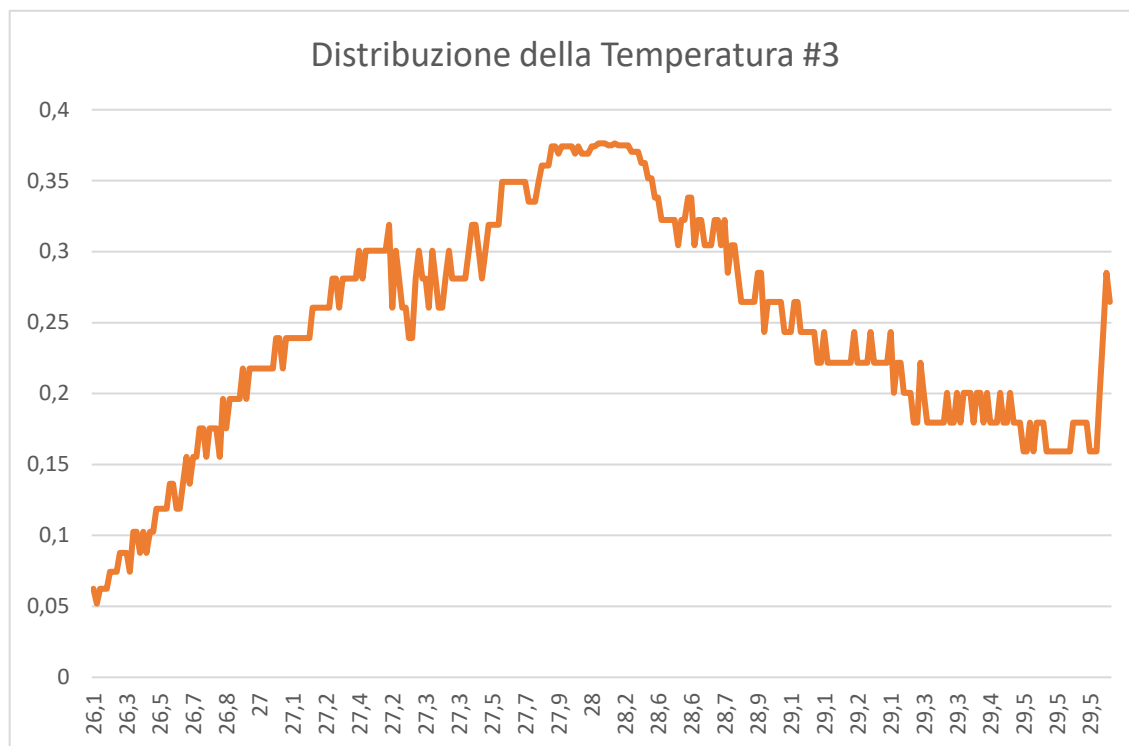


Grafico 6 – Sonda#3 – Distribuzione temperatura

I grafici mostrano chiaramente che le temperature rilevate dalle sonde 2 e 3 all'interno del rack differiscono in minima misura tra loro; infatti, com'è possibile osservare dai grafici la concentrazione maggiore si ha per valori compresi nell'intervallo tra circa 27°C e 29°C **[Grafico 4 e 5]**.

- Come ultima analisi, sono state studiate le correlazioni tra i dati di temperatura raccolti dalle diverse sonde.

Sono stati creati anche in questo caso dei grafici che mostrano la correlazione tra i dati di temperatura della *sonda 1* e *sonda 2*, tra la *sonda 2* e la *sonda 3* e infine tra la *sonda 1* e la *sonda 3*.

Nella correlazione tra la *sonda 1* e la *sonda 2* è possibile vedere come le temperature misurate dalle due sonde tendano a variare quasi allo stesso modo.

L'equazione contenuta nel grafico indica la correlazione lineare tra due variabili, dove y rappresenta il valore della temperatura dipendente e x rappresenta il valore della temperatura indipendente.

Il *coefficiente di correlazione* R^2 pari a 0,9998 indica una forte correlazione tra le due variabili, ovvero le temperature misurate sono fortemente influenzate l'una dall'altra e seguono un andamento lineare. In particolare, il coefficiente 1,193 indica che ad ogni unità di aumento nella temperatura indipendente x corrisponde ad un aumento di 1,193 unità nella temperatura dipendente y . [**Grafico 7**]

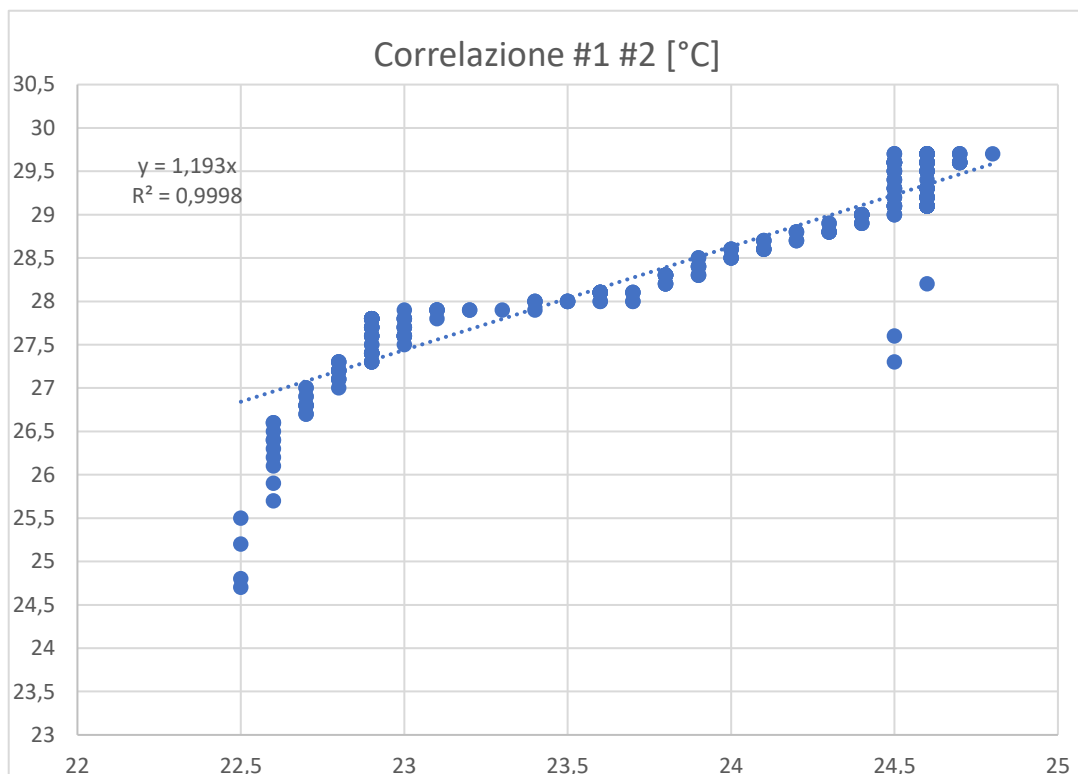


Grafico 7 – Correlazione Sonda#1 & Sonda#2

Nello studio delle temperature tra *sonda 2* e *sonda 3*, la correlazione lineare tra le due variabili suggerisce che esiste una forte relazione inversa tra di esse, ovvero quando una delle variabili aumenta, l'altra diminuisce.

In particolare, il valore di R^2 pari a 0,9999 indica che la maggior parte della variazione della variabile dipendente (y) può essere spiegata dalla variazione della variabile indipendente (x), il che suggerisce un'elevata precisione di regressione del modello lineare.

Inoltre, il *coefficiente angolare* 0,9882 indica che per ogni unità d'aumento della variabile indipendente (x), la variabile dipendente (y) diminuisce di 0,9882 unità. [Grafico 8]

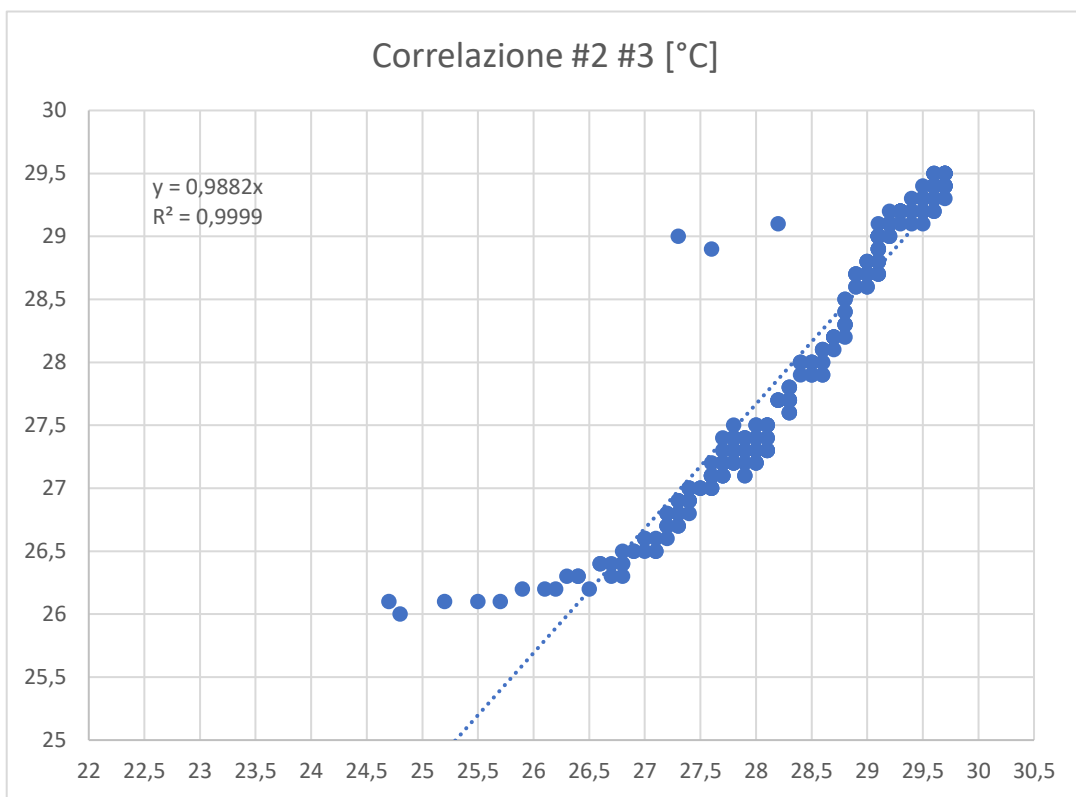


Grafico 8 – Correlazione Sonda#2 & Sonda#3

Infine, l'ultima comparazione è tra la *sonda 1* e la *sonda 3*.

I dati in questo caso indicano una forte correlazione tra le due variabili, con il coefficiente di determinazione R^2 molto elevato (0,9999). In particolare, un aumento di 1°C nella temperatura della *sonda 1* si traduce in un aumento di circa $1,179^\circ\text{C}$ nella temperatura della *sonda 3*.

Questo suggerisce che le due sonde siano influenzate in modo simile dalle variazioni di temperatura dell'ambiente circostante, anche se posizionate in compartimenti separati tra loro.

La forte correlazione lineare indica che i dati sono ben aderenti alla relazione lineare, con una deviazione minima dalle previsioni teoriche. [Grafico 9]

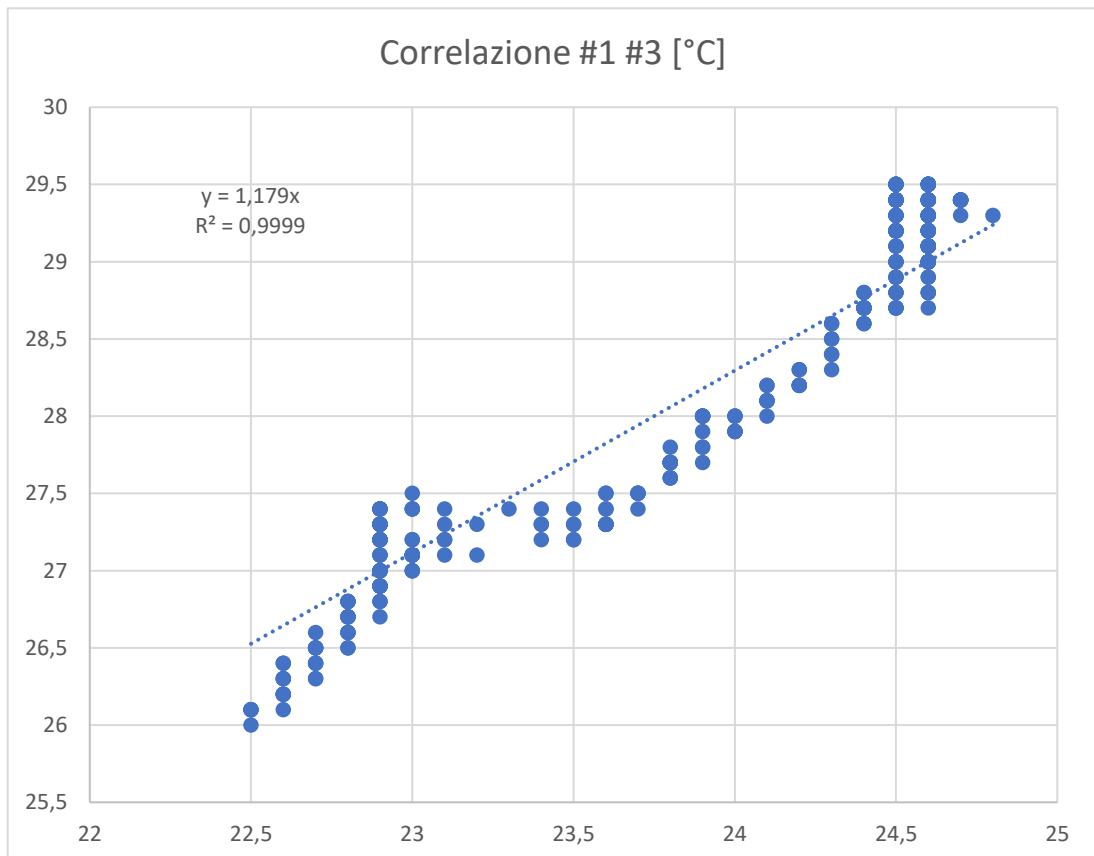


Grafico 9 – Correlazione Sonda#1 & Sonda#3

5.4. Attività di Simulazione

Per effettuare le simulazioni è stato utilizzato il software Ansys Fluent, con il quale è stato possibile ricreare il modello 3D dell'involucro rack e di simulare il flusso d'aria all'interno. La scelta dei modelli e delle tecniche di simulazione è stata guidata dai dati raccolti durante le indagini sperimentali, al fine di rendere il modello il più preciso possibile.

Sono stati impostati i parametri in modo da simulare il flusso d'aria al fine di analizzare il raffreddamento del rack. Sono stati considerati diversi parametri, tra cui la temperatura dell'aria in ingresso e la velocità del flusso d'aria. Sono state inoltre utilizzate le proprietà termofisiche dell'aria, come la viscosità, la conducibilità termica e la densità.

I risultati ottenuti dalle simulazioni sono stati analizzati tramite la visualizzazione di mappe termiche e di flusso d'aria. Sono state esaminate le aree di maggior turbolenza e le zone di accumulo di calore all'interno dell'involucro del rack.

Tuttavia, è importante notare che le simulazioni sono soggette a limitazioni, come la precisione del modello 3D e la rappresentazione accurata delle condizioni di funzionamento del sistema. Per ovviare a questi problemi e affrontare queste limitazioni, sono stati utilizzati dati sperimentali per calibrare e validare il modello, al fine di garantire una simulazione più precisa possibile.

- **Il software: Ansys Fluent**

Fluent è un software di simulazione dinamica dei fluidi computazionale (CFD) che permette di analizzare il comportamento dei fluidi in vari tipi di sistemi e geometrie.

Per quanto riguarda il processo di simulazione, i passi principali svolti, la fine dell'ottenimento dei risultati sono stati i seguenti:

1. Creazione del modello 3D: il primo passo consiste nella creazione della geometria del sistema traendo spunto dalle misure e fotografie ottenute durante i rilevamenti sull'imbarcazione.
2. Definizione delle condizioni al contorno: dopo aver creato la geometria, si definiscono le condizioni al contorno che descrivono il comportamento dei fluidi all'interno del sistema, come velocità iniziali dei fluidi, la temperatura e le proprietà dei materiali.
3. Definizione delle equazioni di flusso: in questa fase si descrivono le equazioni matematiche che descrivono il comportamento dei fluidi all'interno del sistema. Fluent utilizza le equazioni di Navier-Stokes* per descrivere il flusso dei fluidi.

4. Meshing: la Mesh è la discretizzazione della geometria in celle, che permette di risolvere le equazioni differenziali appena citate. Fluent dispone di diverse opzioni di meshing che permettono di scegliere la dimensione della cella e la sua forma.
5. Simulazione: dopo aver impostato tutti i parametri, si avvia la simulazione. Fluent risolve le equazioni di Navier-Stokes⁷ e restituisce i risultati in termini di distribuzione di velocità, pressione e temperatura all'interno del sistema.
6. Analisi dei risultati: una volta terminata la simulazione, si analizzano i risultati ottenuti. Fluent permette di visualizzare le mappe termiche e le curve di distribuzione della velocità e pressione utili per l'analisi del comportamento dei fluidi.

Per quanto riguarda la creazione di mappe termiche, Fluent permette di generare mappe termiche 2D e 3D a partire dai dati di temperatura ottenuti dalla simulazione. Queste mappe permettono di visualizzare la distribuzione di temperatura all'interno del sistema e di individuare eventuali zone di surriscaldamento o raffreddamento.

Un approccio simile è stato svolto nella ricerca di Mukaffi e Arief [14] riguardante il caso studio del data center PAU ITB, anche in questo caso l'ottimizzazione viene eseguita utilizzando la simulazione di fluidodinamica computazionale (CFD) come fase successiva a quella dell'acquisizione dati tramite sonde di temperatura con l'obiettivo finale di ottimizzare i flussi d'aria.

⁷ Equazioni di Navier-Stokes: Sono equazioni differenziali che descrivono il movimento dei fluidi. Descrivono come la pressione, la densità e la viscosità dei fluidi sono correlate tra loro.

5.4.1. Caso studio – Main Rack della Navetta 33.21

Dopo aver creato il modello 3D, andando a creare e configurare i passaggi d'aria all'interno del vano, si andranno a definire le condizioni al contorno, in particolare, nel caso in esame:

- **Numero di iterazioni, numero e grandezza dei passi temporali**
 - Il parametro "Max iterations/time steps" rappresenta il numero massimo di iterazioni che il software Fluent esegue per ogni passo temporale. In altre parole, questo parametro rappresenta il limite massimo di iterazioni consentite per ogni passo temporale. Se i criteri vengono soddisfatti prima che venga eseguito questo numero di iterazioni, la soluzione passerà alla fase temporale successiva. In questo caso è stato inserito 20 come valore massimo di iterazioni consentite per ogni passo temporale.
 - Il valore della grandezza del passo temporale (Time Step) indica l'intervallo di tempo tra due istanti successivi di simulazione, ovvero quanto spazio temporale viene considerato ogni volta nell'analisi della simulazione. In questo caso, la grandezza del passo è di 0.01 secondi, il che significa che ogni passo temporale rappresenta un intervallo di 10 millisecondi di tempo.
 - Il numero di passi temporali indica il numero di volte che il software calcola la soluzione numerica della simulazione durante l'intervallo di tempo totale della simulazione. In questo caso, sono stati specificati 200 passi temporali, il che significa che la simulazione è stata eseguita per un totale di 200×0.01 secondi, ovvero 2 secondi.

- **Modello di Turbolenza**

Per questa simulazione è stato utilizzato il modello di turbolenza K-epsilon standard, il quale si basa sull'ipotesi che la turbolenza possa essere descritta attraverso due variabili di trasporto, ovvero l'energia cinetica turbolenta (k) e la dissipazione turbolenta (epsilon).

- **Modello di Radiazione**

In questo caso il modello di trasferimento radiativo è quello di Rosseland. Esso descrive il trasferimento di energia radiativa all'interno di un sistema attraverso l'uso di un'equazione di bilancio energetico per radiazione. In particolare, il modello di Rosseland si basa sull'ipotesi che la radiazione si muova all'interno del materiale in modo diffuso e che la sua intensità sia costante lungo ogni direzione.

Per quanto riguarda il carico solare, non è stato considerato visto che non sono presenti aperture dalle quali la radiazione solare possa penetrare ed interagire.

- **Proprietà dei materiali**

- **Fluido:** Come fluido è stata utilizzata l'aria con le sue relative proprietà.

Properties

Density (kg/m3)	ideal-gas	Edit...
Cp (Specific Heat) (j/kg-k)	constant	Edit...
	1006.43	
Thermal Conductivity (w/m-k)	constant	Edit...
	0.0242	
Viscosity (kg/m-s)	constant	Edit...
	1.7894e-05	
Molecular Weight (kg/kmol)	constant	Edit...
	28.966	
Absorption Coefficient (1/m)	constant	Edit...
	0	
Scattering Coefficient (1/m)	constant	Edit...
	0	
Scattering Phase Function	isotropic	Edit...
Refractive Index	constant	Edit...
	1	

- **Solido:** Per rappresentare la struttura del rack è stato utilizzato come materiale l'alluminio con le sue relative proprietà.

Properties

Density (kg/m3)	constant	Edit...
	2719	
Cp (Specific Heat) (j/kg-k)	constant	Edit...
	871	
Thermal Conductivity (w/m-k)	constant	Edit...
	202.4	

- **Impostazione degli Input**

Per quanto riguarda le fonti di calore e quindi dei flussi termici che le apparecchiature andranno a generare, è stato utilizzato il valore di 185 W/m^2 per tutti gli Heater.

Il valore di velocità di estrazione dell'aria (velocity-inlet) è stato preso dalle schede tecniche dell'aspiratore centrifugo facendo una media tra i valori di portata alla massima velocità e minima velocità pari a $150 \text{ m}^3/\text{h}$.

6. RISULTATI

6.1. Attività Sperimentali – Analisi dei Grafici

Le sonde di temperatura sono state posizionate in punti strategici all'interno dell'ambiente, tra cui la sonda 1 posta a metà del rack, la sonda 2 posizionata sul tetto del rack e la sonda 3 posta di fronte alla bocchetta di aspirazione dell'aspiratore centrifugo in un vano separato ma comunicante tramite delle aperture.

Le linee di tendenza delle temperature rilevate dalle sonde mostrano un aumento graduale della temperatura lungo il condotto del vano principale, come atteso, a causa del calore generato dalle apparecchiature.

La linea di tendenza della sonda 1 mostra un aumento graduale della temperatura lungo il vano, a causa del calore generato dalle apparecchiature elettriche presenti all'interno.

La sonda 2, posizionata sul tetto del rack, mostra invece un aumento di temperatura più accentuato, probabilmente a causa dell'accumulo di calore in questa zona.

Infine, la sonda 3, posizionata davanti alla bocchetta di aspirazione, presenta un aumento di temperatura maggiore rispetto le altre due. Questo suggerisce che l'aspiratore centrifugo, sebbene posizionato in un vano separato, sta aspirando aria calda dal vano principale, contribuendo ad innalzare la temperatura nella zona circostante.

- **Temperature**

Dall'analisi dei dati rilevati, la temperatura massima raggiunta all'interno del vano principale è di 29,7 °C rilevata sul tetto della struttura.

Questo dato, facendo riferimento alle linee guida ASHRAE "Thermal guidelines for data processing environments" [5], eccede quelle che sono le condizioni ambientali operative della maggior parte delle apparecchiature, condizioni comprese tra i valori di 18°C e 27°C.

Nonostante l'eccedenza di temperatura rispetto alla media, la maggior parte dei ricercatori, come sottolineato in [2,3], considera 85°C la temperatura massima consentita per evitare malfunzionamenti.

In generale, l'analisi delle linee di tendenza delle sonde suggerisce che le temperature all'interno del vano aumentino gradualmente dal basso verso l'alto, con una crescita più accentuata nella zona superiore. Ciò è probabilmente dovuto al fatto che l'aria calda tenda a salire verso l'alto, accumulandosi. In particolare, la sonda 1 che, posizionata nel punto più basso dell'armadio, rileva temperature più basse rispetto alle altre due, confermando che l'aria calda tende a salire verso il tetto del vano. Inoltre, la sonda 3, posizionata davanti alla bocchetta di aspirazione dell'aspiratore centrifugo, rileva temperature leggermente inferiori rispetto alla sonda 2, posizionata sul tetto dell'armadio. Questo suggerisce che l'aspiratore centrifugo riesca ad estrarre abbastanza efficacemente l'aria calda dal vano principale, anche essendo separati i due locali.

In generale, questi risultati suggeriscono che è importante progettare adeguatamente il sistema di ventilazione degli armadi rack, al fine di garantire una distribuzione uniforme della temperatura al loro interno. In particolare, l'aspiratore centrifugo sembra essere un'opzione efficace per estrarre l'aria calda dal vano principale, ma potrebbero essere necessarie ulteriori modifiche per migliorare la distribuzione all'interno del vano stesso, come quella di modificare e ottimizzare le aperture per il passaggio dell'aria, evitando la formazione di accumuli.

6.2. Attività di Simulazione – Analisi dei flussi

Passando ai risultati ottenuti dalla simulazione, le immagini dei flussi d'aria e la distribuzione del calore permettono di osservare in modo dettagliato la distribuzione della temperatura e della velocità dell'aria all'interno del sistema. In particolare, è possibile notare l'effetto del raffreddamento sulle apparecchiature all'interno del rack e la distribuzione dell'aria calda nel vano.

Inoltre, la simulazione ha permesso di valutare l'efficacia del sistema di raffreddamento e di identificare eventuali problemi o inefficienze nella distribuzione dell'aria. Questi risultati possono essere utilizzati per ottimizzare il sistema di raffreddamento e migliorare le prestazioni delle apparecchiature all'interno del rack.

Le immagini che seguiranno mostreranno il risultato della simulazione e permetteranno di comprendere meglio il comportamento del flusso d'aria e della temperatura all'interno del vano.

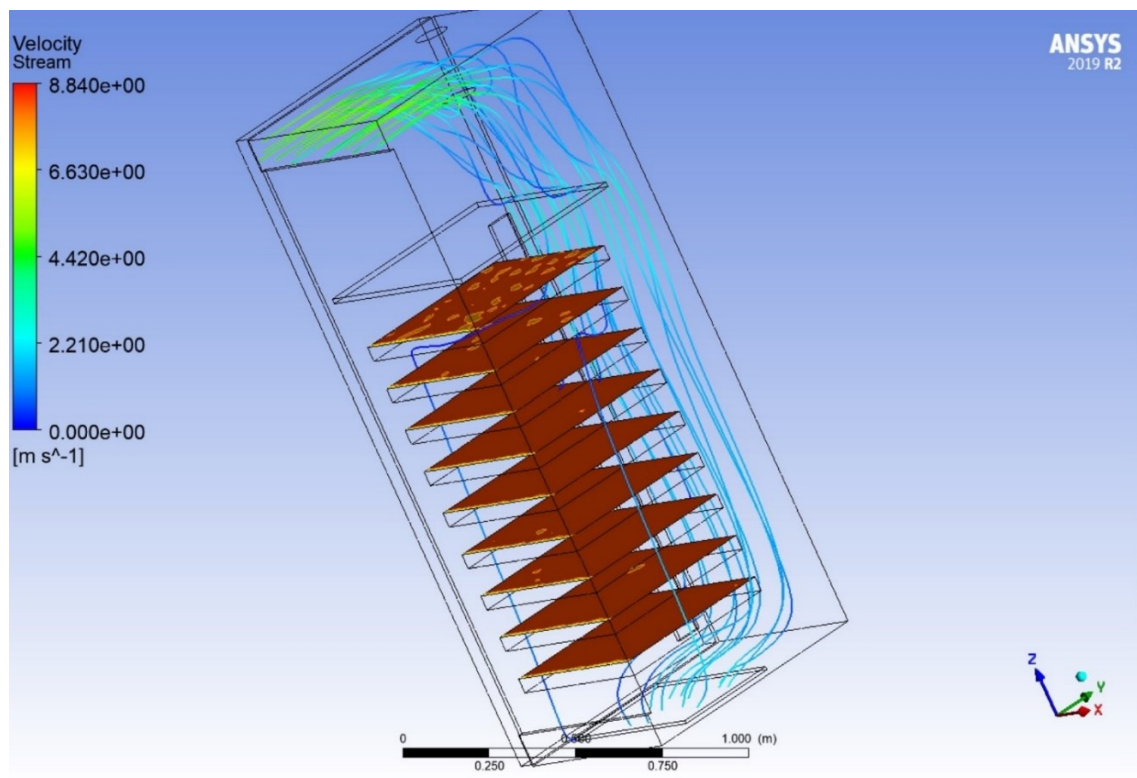


Figura 16 – Flusso d'aria intero vano rack.

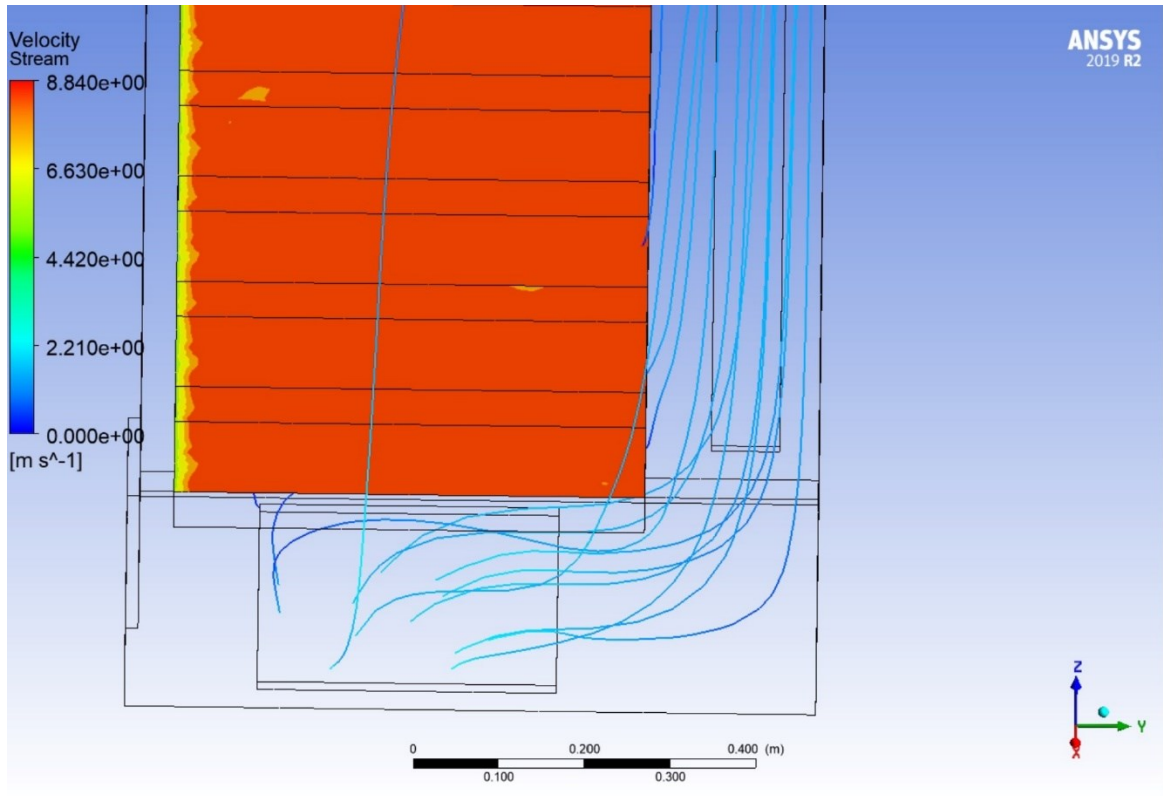


Figura 15 – Ingresso d'aria apertura inferiore del vano principale.

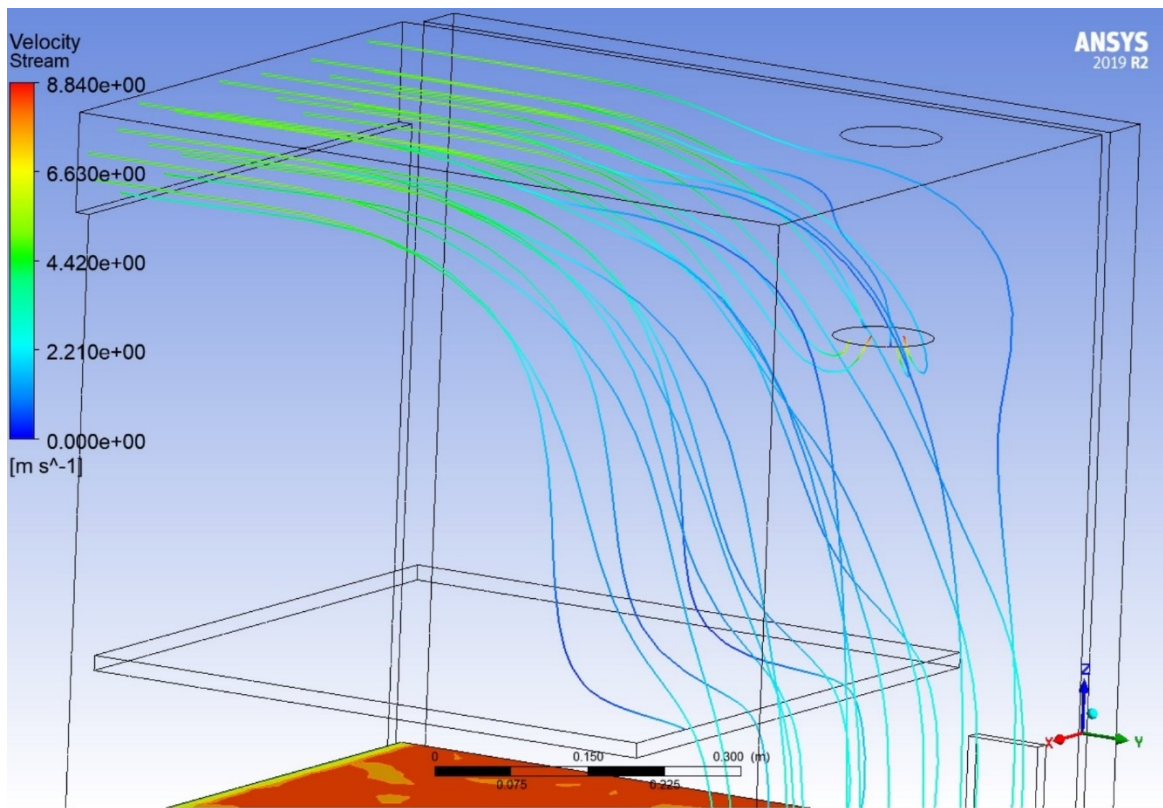


Figura 17 – Ingresso Flusso d'aria apertura superiore del vano aspirazione.

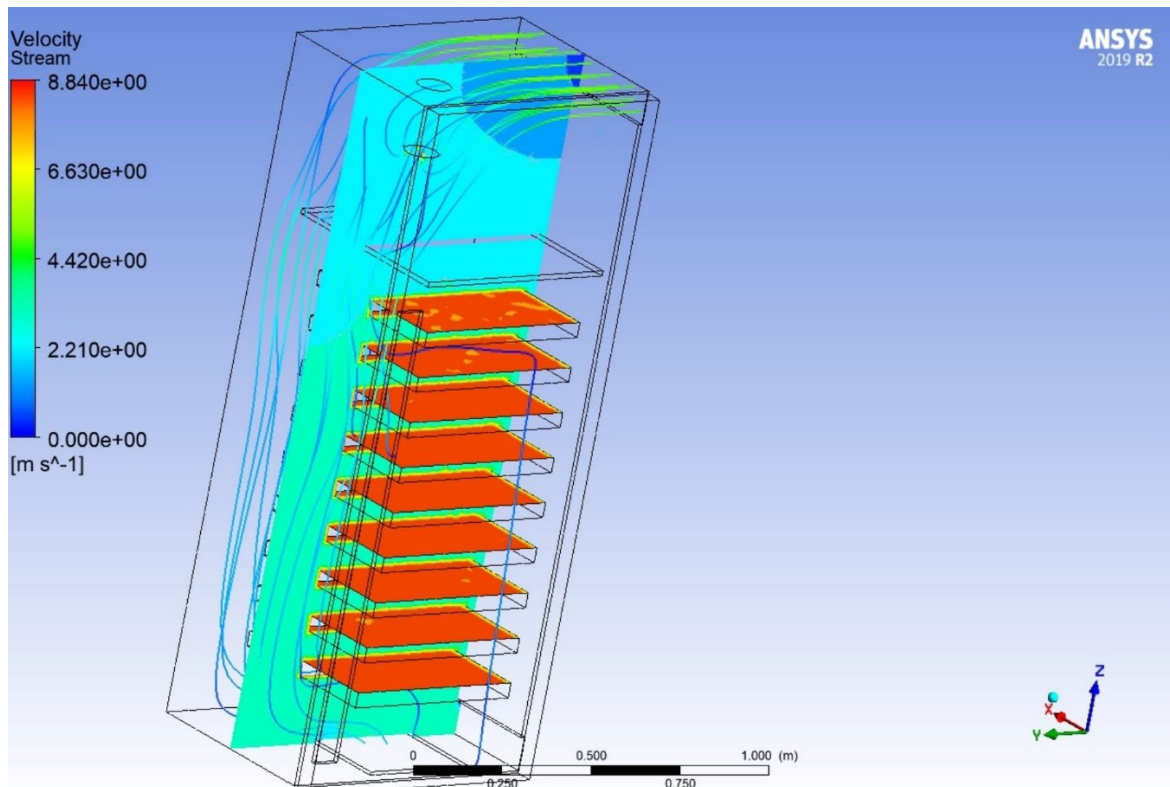


Figura 18 – Flusso d’aria con distribuzione di temperatura

Le figure 12 – 13 e 14 rappresentano la “*Velocity stream*” ossia la velocità del fluido in ogni punto del dominio della simulazione. Nelle immagini le linee rappresentano le traiettorie del fluido, evidenziando come questo si muova a diverse velocità all’interno dei vani. *La figura 15* mette in relazione la distribuzione di temperatura con la velocità del fluido in modo tale da capire i cambiamenti di velocità del flusso in base alla temperatura dell’ambiente

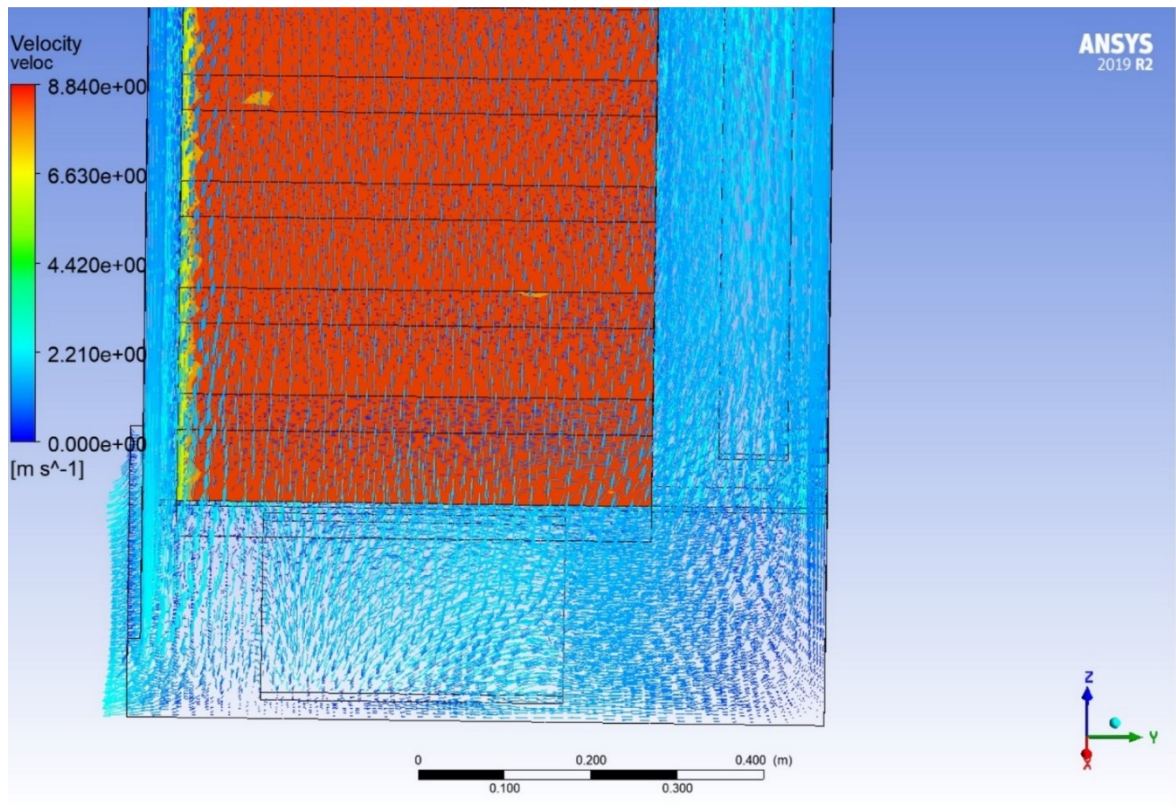


Figura 19 – Velocità dell'aria in ingresso nella parte inferiore del vano principale.

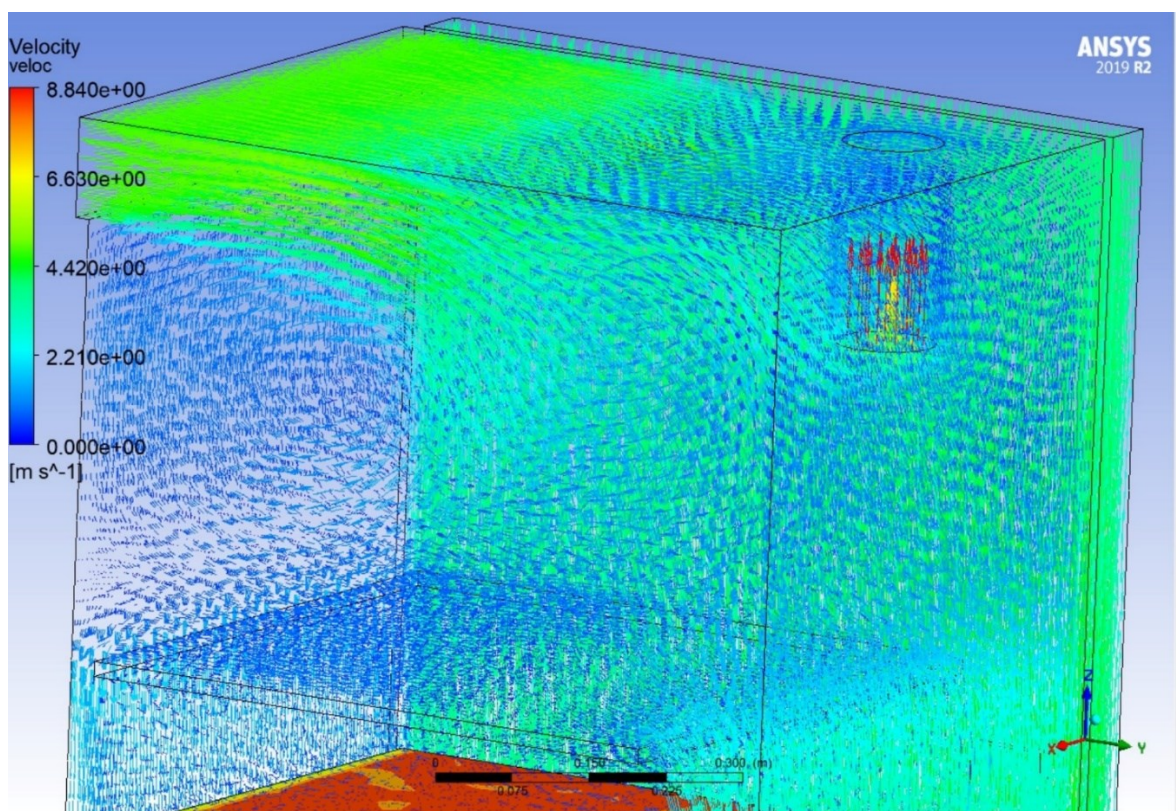


Figura 20 – Velocità dell'aria in ingresso nella parte superiore del vano di aspirazione, particolare condotto di aspirazione.

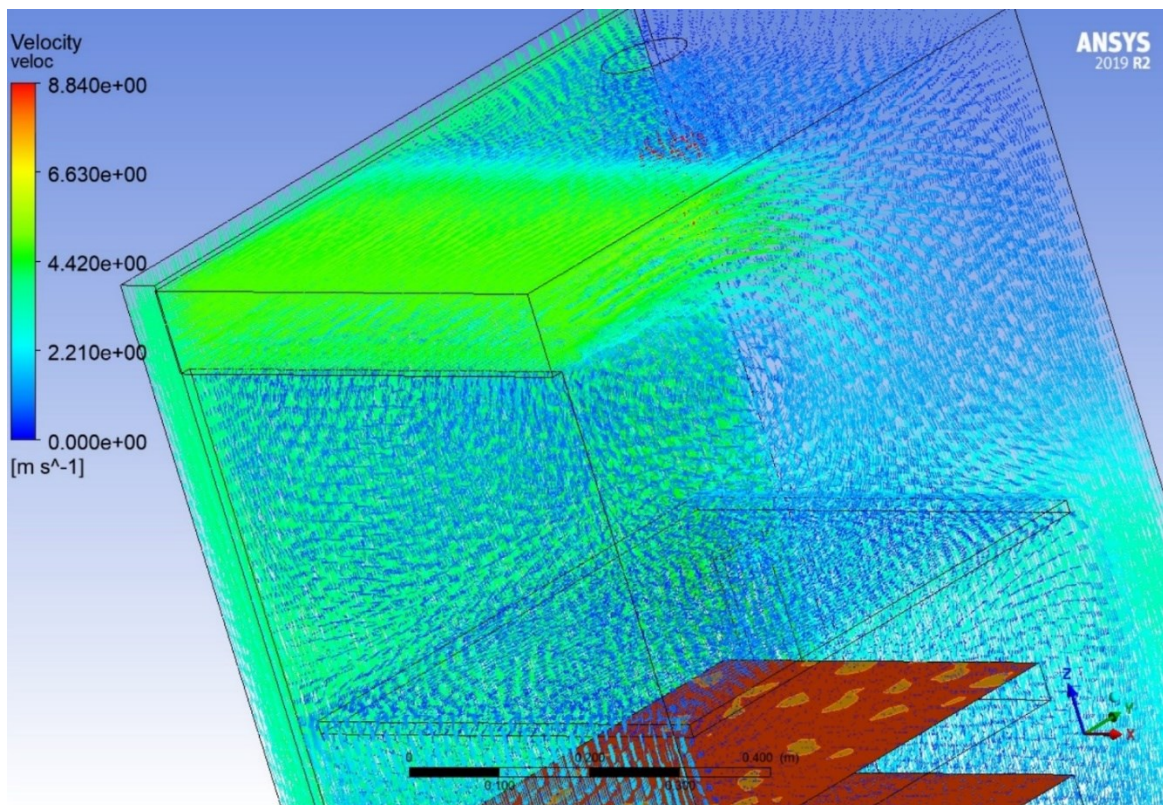


Figura 21 – Velocità dell'aria in ingresso nella parte superiore del vano di aspirazione.

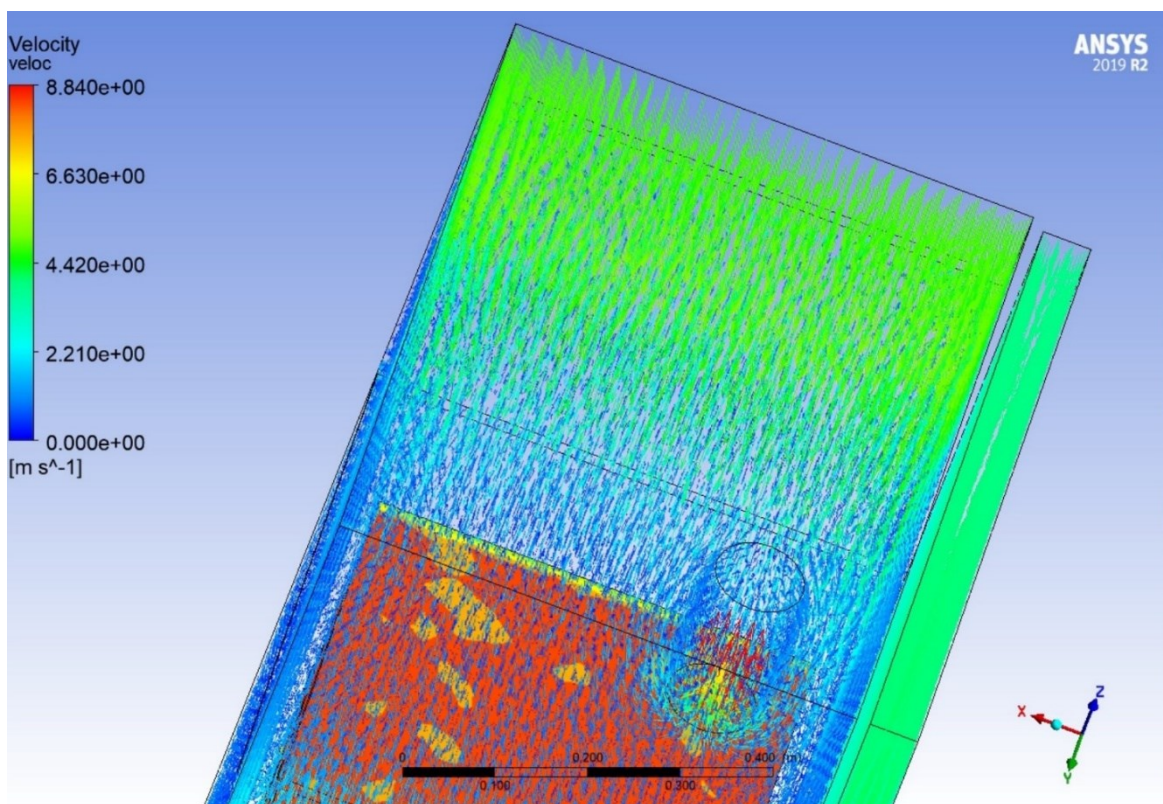


Figura 22 – Vista dall'alto della velocità dell'aria nel vano superiore, particolare condotto di aspirazione

Le figure 16 – 17 – 18 e 19 mostrano il “Velocity vector” ossia la velocità del fluido in ogni punto del dominio di simulazione, utilizzando frecce che indicano la direzione e la magnitudo del vettore velocità in ogni punto. Queste immagini forniscono una rappresentazione visiva della distribuzione della velocità del fluido all’interno dei vani.

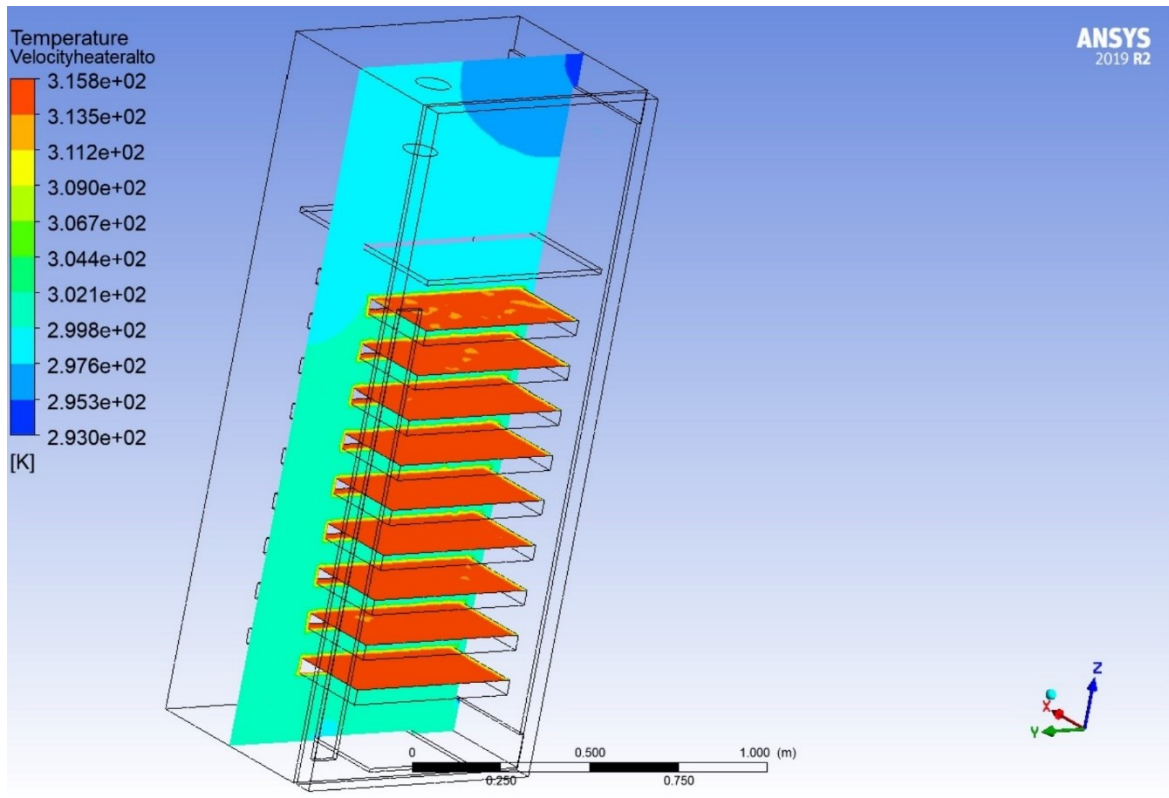


Figura 23 – Distribuzione della temperatura all’interno di entrambi i vani.

La figura 20 mostra la “Temperature Heater”, la distribuzione della temperatura del fluido nel dominio della simulazione, evidenziando le zone più calde e più fredde del fluidi. In questa immagine, le zone rosse rappresentano le apparecchiature e quindi le zone più calde.

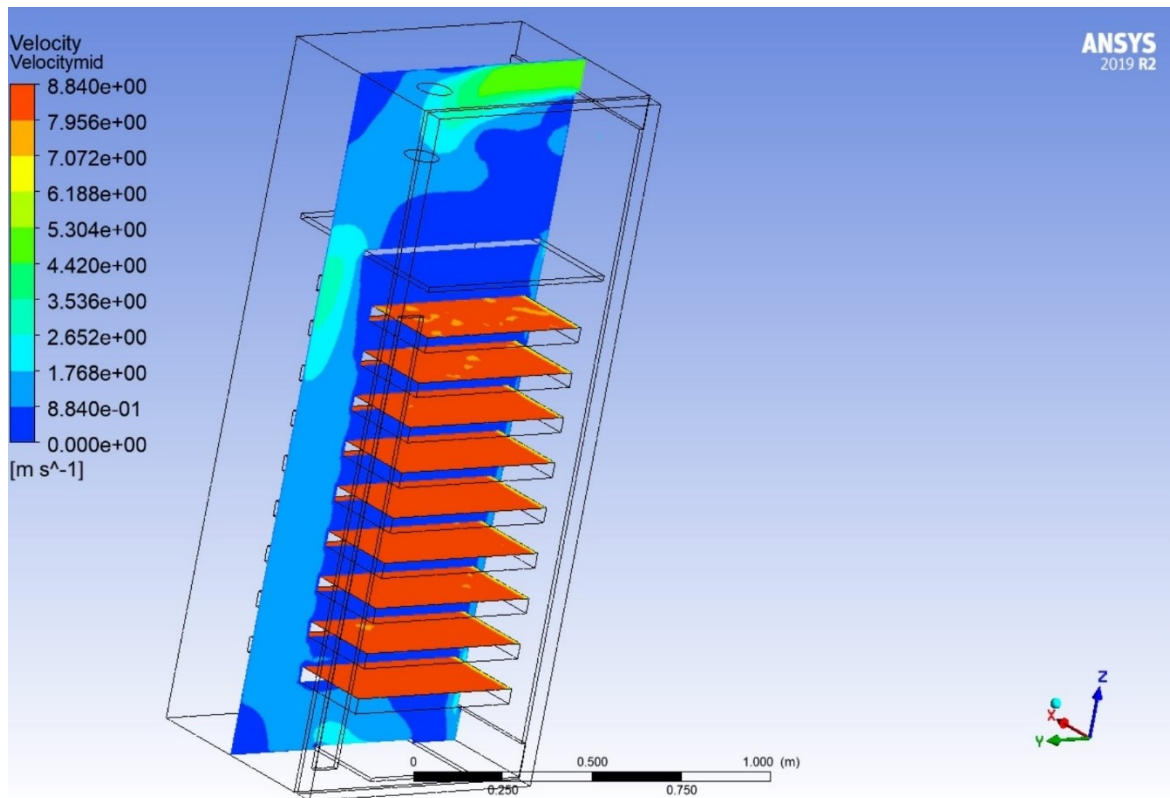


Figura 24 – Distribuzione della velocità all'interno di entrambi i vani.

La figura 21 rappresenta la "Velocity mid" ossia la distribuzione della temperatura del fluido nel dominio di simulazione. È possibile osservare gli incrementi di velocità nei punti in cui ci sono restrizioni di sezione, negli ingressi di aria e su ognuna delle apparecchiature, le quali hanno il proprio sistema di dissipazione di calore.

- **Discussione dei risultati**

In generale, queste immagini forniscono una rappresentazione visiva dei dati di simulazione, aiutando a comprendere meglio il comportamento dell'aria all'interno del rack.

Una volta effettuata l'analisi delle immagini, è stato possibile ricavare importanti informazioni sulla dinamica dei fluidi all'interno del sistema in esame. Ad esempio, l'analisi del *"Velocity stream"* ha permesso di individuare le zone di maggior turbolenza all'interno del sistema corrispondenti agli ingressi d'aria, alle restrizioni di sezione e l'imbocco dell'aspiratore centrifugo, mentre l'analisi della *"Velocity veloc"* ha fornito informazioni sul flusso di fluido attorno alle apparecchiature.

Anche l'analisi della *"Temperature Heater"* e della *"Velocity mid"* ha permesso di ottenere informazioni cruciali per la comprensione del fenomeno in esame. In particolare, l'analisi della temperatura ha consentito di individuare le zone di maggior accumulo di calore all'interno del sistema, consentendo di formulare soluzioni come la modifica dell'apertura che mette in comunicazione il vano principale con quello superiore nel quale è presente l'aspiratore, in questo modo si eviterà l'accumulo di aria calda sul tetto del vano principale scongiurando anche fenomeni di ricircolo e bypass dell'aria.

Inoltre, la simulazione numerica ha permesso di visualizzare le mappe termiche del flusso d'aria all'interno dell'armadio, confermando le variazioni di temperatura rilevate sperimentalmente. La simulazione ha inoltre permesso di valutare l'effetto di alcune modifiche al sistema di ventilazione, come ad esempio l'introduzione di deflettori o l'aumento della velocità dell'aria, sulla distribuzione della temperatura all'interno del vano.

In generale, le mappe termiche e le immagini ottenute dalla simulazione con Fluent hanno contribuito ad acquisire una conoscenza più approfondita dei fenomeni termici e fluidodinamici all'interno del sistema in esame, consentendo di individuare criticità e proporre eventuali soluzioni per migliorare le prestazioni del sistema.

7. CONCLUSIONI

Le attività sperimentali e di simulazione hanno permesso di ottenere informazioni utili per comprendere il flusso d'aria e la distribuzione di calore all'interno del vano contenente le apparecchiature AV-IT.

Dalle rilevazioni sperimentali è emerso che la temperatura all'interno del vano varia lungo la sua altezza, con un incremento maggiore nella parte superiore rispetto a quella inferiore. Inoltre, l'utilizzo di sonde di temperatura ha permesso di tracciare le linee di tendenza lungo le diverse posizioni all'interno del vano.

Dalla simulazione numerica attraverso Fluent sono state ottenute informazioni dettagliate sulla distribuzione del calore e dei flussi d'aria dei vani in esame. In particolare, le immagini hanno mostrato come l'aspiratore centrifugo, posizionato in un vano separato, influenzi il flusso d'aria all'interno del vano principale. Le immagini termiche hanno evidenziato come il calore generato dalle apparecchiature AV-IT si distribuisca lungo il vano, con una maggiore concentrazione nella parte superiore; risultati simili, visto che la simulazione numerica è stata svolta utilizzando i dati sperimentali ottenuti durante i test a bordo.

I risultati ottenuti possono essere utili per migliorare la progettazione dei sistemi di raffreddamento, ad esempio, migliorando la posizione e l'orientamento degli aspiratori, scegliendo materiali isolanti o utilizzando deflettori per incanalare i flussi.

In futuro, i risultati di questa ricerca potrebbero essere utilizzati per migliorare la progettazione e l'efficienza dei sistemi di raffreddamento in ambienti con simili configurazioni.

Le prossime attività di ricerca potrebbero includere la valutazione dell'efficacia di soluzioni progettuali alternative tramite simulazioni avanzate, l'analisi dell'effetto di diverse configurazioni del vano come riportato anche nell'articolo di Mukaffia e Ariefa [14], nella quale l'ottimizzazione viene effettuata aggiungendo pannelli ciechi, contenimento del corridoio freddo e modificando la disposizione dei componenti e dei ripiani ed infine la valutazione degli impatti ambientali dell'uso di sistemi di raffreddamento in ambienti di questo tipo.

RIFERIMENTI

- [1] Koomey J. *Growth in data center electricity use 2005 to 2010*. A report by Analytical Press, completed at the request of The New York Times. 2011.
- [2] Ebrahimi K, Jones GF, Fleischer AS. *A review of data center cooling technology, operating conditions and the corresponding low-grade waste heat recovery opportunities*. *Renew Sust Energy Rev* 2014;31:622–38.
- [3] Marcinichen JB, Olivier JA, Thome JR. *On-chip two-phase cooling of datacenters: Cooling system and energy recovery evaluation*. *Appl Therm Eng* 2012; 41: 36-51
- [4] Anandan SS, Ramalingam V. *Thermal management of electronics: A review of literature*. *Therm Sci* 2008; 12(2): 5-26.
- [5] ASHRAE whitepaper. *Thermal guidelines for data processing environments— expanded data center classes and usage guidance, Technical Committee (TC) 9.9, ASHRAE; 2011*.
- [6] Schmidt RR, Cruz EE, Iyengar MK. *Challenges of data center thermal management*. *IBM J Res Dev* 2005;49(4/5):709–23
- [7] Capozzoli A, Chinnici M, Perino M, Serale G. *Review on Performance Metrics for Energy Efficiency in Data Center: The Role of Thermal Management*, LECT NOTES COMPUT SC, Vol. 8945, 2015, pp 135-151.
- [8] Capozzoli A, Serale G, Liuzzo L, Chinnici, M. *Thermal Metrics for Data Centers: A Critical Review*. *Energy Procedia*, 2014; 62, 391-400.
- [9] Cho J, Yang J, Park W. *Evaluation of air distribution system's airflow performance for cooling energy savings in high-density data centers*. *Energ Buildings* 2014; 68: 270–279.
- [10] Lu T, Lü X, Remes M., Viljanen M. *Investigation of Air Management and Energy Performance in a Data Center in Finland: Case study*. *Energ Buildings* 2011; 43(12): 3360–3372.
- [11] Niemann J, Brown K, Avelar V. *Impact of Hot and Cold Aisle Containment on Data Center Temperature and Efficiency*. *APC White Paper* 2011; 135.
- [12] Dunlap K, Rasmussen N. *Choosing Between Room, Row, and Rack-based Cooling for Data Centers*. *APC White Paper* 2012; 130.
- [13] Almoli A, Thompsion A, Kapur N, Summers J, Thompson H, Hannah G. *Computational fluid dynamic investigation of liquid rack cooling in data centres*. *Appl Energ* 2012;89:150–5.

[14] Akhmad R. I. Mukaffia, Rizky S. Arief, Wisnu Hendradjita, Rahmat Romadhon. *Optimization of Cooling System for Data Center. Case Study. PAU ITB Data Center. Procedia Engineering 170 (2017) 552 – 557*