

# Politecnico di Milano

V Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria delle Telecomunicazioni

Dipartimento di Elettronica e Informazione



## Impatto del ricircolo dell'aria sui consumi di un data center

Relatore: Prof. Paolo **CREMONESI**

Correlatore: Ing. Andrea **SANSOTTERA**

Autore: Maria **GREPPI**

Matr. 749940

Anno Accademico 2010/2011

# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>I lavori precedenti in ambito e lo stato dell'arte</b>	<b>10</b>
2.1	Sensor-based fast thermal evaluation model for energy efficient high-performance data centers . . . . .	10
2.2	Thermal-aware task scheduling for data centers through minimizing heat recirculation . . . . .	11
2.3	PowerNap: eliminating server idle power . . . . .	14
2.4	Cooling-aware workload placement with performance constraints . . . . .	16
2.5	Modelling and managing thermal profiles of rack-mounted servers with thermoStat . . . . .	17
2.6	Trends and effects of energy proportionality on server provisioning in data centers . . . . .	19
2.7	Effect of transient boundary conditions and detailed thermal modeling of data center rooms . . . . .	19
2.8	The superposition technique for thermal management . . . . .	20
<b>3</b>	<b>Impostazione del problema di ricerca</b>	<b>22</b>
3.1	Modello del flusso di calore . . . . .	22
3.2	Disegno del layout target . . . . .	26
3.2.1	Geometria . . . . .	26
3.2.2	Condizioni al contorno . . . . .	28
3.2.3	User Defined Function . . . . .	29
3.2.4	Parametrizzazione del modello del flusso di calore . . . . .	30

## INDICE

---

3.2.5	Data set simulation . . . . .	30
<b>4</b>	<b>Proposte di modelli, realizzazioni sperimentali e validazione</b>	<b>38</b>
4.1	Modello lineare . . . . .	38
4.1.1	Le realizzazioni sperimentali . . . . .	39
4.1.2	L'obbiettivo . . . . .	41
4.1.3	Analisi degli errori . . . . .	43
4.2	Gli scenari . . . . .	44
<b>5</b>	<b>Una nuova matrice di <i>cross interference</i></b>	<b>47</b>
5.1	La matrice di cross interference . . . . .	47
5.2	La cross interference modificata . . . . .	51
5.3	Analisi dei risultati . . . . .	53
<b>6</b>	<b>Conclusioni e sviluppi futuri</b>	<b>59</b>
6.1	Conclusioni . . . . .	59
6.2	Sviluppi futuri . . . . .	61
	<b>Appendice A</b>	<b>62</b>
	<b>Elenco delle figure</b>	<b>66</b>
	<b>Elenco delle tabelle</b>	<b>67</b>
	<b>Ringraziamenti</b>	<b>68</b>

# Sommario

Questo breve capitolo ha una triplice funzione: descrivere l'ambito del problema, descrivere lo scopo del lavoro di tesi e anticipare le conclusioni.

## L'ambito del problema

L'ambito all'interno del quale si colloca questo lavoro di tesi è la necessità di predire, nella maniera più accurata possibile, l'effetto dovuto al blocco delle ventole di raffreddamento di nodi spenti all'interno di un data center, in vista di scenari in cui il carico utilizzato non necessita l'utilizzo di tutti i server presenti nel nodo (*enclosure*). I data center non compartimentati, cioè all'interno dei quali gli armadi di rack non sono isolati termicamente, sono soggetti al ricircolo di flussi d'aria calda: questo significa che l'aria fredda fornita dal condizionatore entra in ciascun nodo e ne fuoriesce a temperatura maggiore. L'aria in uscita da ogni nodo rientra negli altri nodi del data center, con un impatto più o meno pesante in base alla disposizione dei nodi all'interno del data center, e ricircola anche al suo ingresso. La presenza di questo flusso altera l'efficacia del condizionamento sui nodi, quindi è necessaria una predizione del suo effetto molto accurata.

## Lo scopo del lavoro di tesi

L'obiettivo del lavoro di tesi è ricavare un modello matematico che permetta di descrivere l'effetto dello spegnimento delle ventole dei server all'interno di un data center. L'obiettivo è definire un modello che sia invariante rispetto alla potenza. Abbiamo iniziato il nostro studio preliminare analizzando quali fossero il

valore e il limite del *principio della sovrapposizione degli effetti* come metodologia di stima dell'effetto dello spegnimento di  $M$  nodi (dove  $M$  è il numero di nodi spenti, molto inferiore al numero di nodi complessivi del data center). Abbiamo poi studiato un modello basato sul concetto di *cross interference*, un metodo per descrivere il ricircolo d'aria generato e subito dai nodi all'interno di un data center. Abbiamo implementato questo metodo imponendo però che i nodi con le ventole di raffreddamento bloccate avessero un *fattore di generazione di ricircolo nullo*. Questo effetto ha prodotto una variazione del flusso d'aria descritto nello scenario, in quanto il contributo d'aria in uscita dal nodo non fornisce alcuna modifica sostanziale al flusso d'ingresso siccome l'interno del nodo, quindi lo spazio compreso tra faccia d'ingresso e faccia d'uscita, non contiene alcun elemento forzante. Questo implica anche che il contributo d'aria fredda fornito dal condizionatore, che entra dalla faccia d'ingresso (per come è impostata la geometria del nostro modello), è massimo, quindi la temperatura globale del flusso di raffreddamento è più elevata e fornisce maggiore efficacia.

La tesi si compone di cinque parti:

- Il capitolo 1 costituisce un'introduzione all'ambito nel lavoro di tesi
- Il capitolo 2 riguarda uno studio dello stato dell'arte e dei lavori inerenti al contenuto
- Il capitolo 3 introduce la geometria del data center simulato e definisce le caratteristiche del modello del flusso di calore utilizzato
- Il capitolo 4 propone una prima metodologia di stima dell'effetto dello spegnimento delle ventole sulla distribuzione della temperatura all'interno del data center
- Il capitolo 5 propone un'altra metodologia più stabile ai fini del controllo dell'errore
- Nel capitolo 6 vengono fornite le conclusioni del lavoro di tesi e i possibili sviluppi futuri

## Le conclusioni

Il primo modello proposto, basato sul *principio di sovrapposizione degli effetti*, fornisce un errore minore di 2 K, nel caso di spegnimento fino a 4 nodi, ma nel caso di spegnimento di 8 nodi l'errore è eccessivo, quindi questo modello di stima non è più accettabile. Il secondo modello implementato, invece, fornisce un errore massimo minore di 2 K, tranne in alcune zone ben identificate della stanza in cui sono stati evidenziati picchi di 4.5 K. L'errore medio massimo è 1.3 K. La particolarità del lavoro deriva dal fatto che l'errore risulta stabile, omogeneo nei vari scenari.

# Capitolo 1

## Introduzione

Secondo un studio condotto da Enerdata [1], il consumo energetico mondiale nel 2010 è cresciuto rispetto al 2009, del 5%. Nel 2009 si era registrato un calo globale del consumo energetico, attribuibile alla crisi che ha invaso il pianeta, mentre l'anno successivo ha visto una vera inversione di tendenza che ha una duplice ragione: da un parte la naturale ripresa dei paese industrializzati e il conseguente ritorno al consumo di fonti di energia rinnovabili e non, dall'altra la forte richiesta di energia di China e India che, nell'anno di crisi non hanno mai diminuito le loro necessità.

Come conseguenza di quanto appena detto le emissioni di CO<sub>2</sub> dei 20 maggiori consumatori mondiali di energia sono in aumento, a partire dal 1990 e fino al 2010 di un tasso circa pari al 2% / anno. Per quanto riguarda il caso italiano l'aumento graduale degli ultimi anni viene riportato nella figura 1.3

Ulteriormente preoccupante è la stima delle emissioni di CO<sub>2</sub> in Italia per l'anno 2012, al di sopra dei limiti imposti dal Protocollo di Kyoto 1.4.

Per quanto riguarda il settore dell' Information and Communication Technology la situazione non è migliore. Gli analisti e gli esperti del settore, infatti, stimano che l'emissione di CO<sub>2</sub> per la produzione, l'utilizzo e la smaltimento delle apparecchiature elettroniche siano pari al 2% delle emissioni globali e che, nel 2020, a seguito di un sempre più vasto e intenso utilizzo delle stesse, avranno un aumento ulteriore del 50%. La percentuale di emissioni prodotte sono paragonate a quelle dell'industria aeronautica, che però impatterebbero in modo maggiore

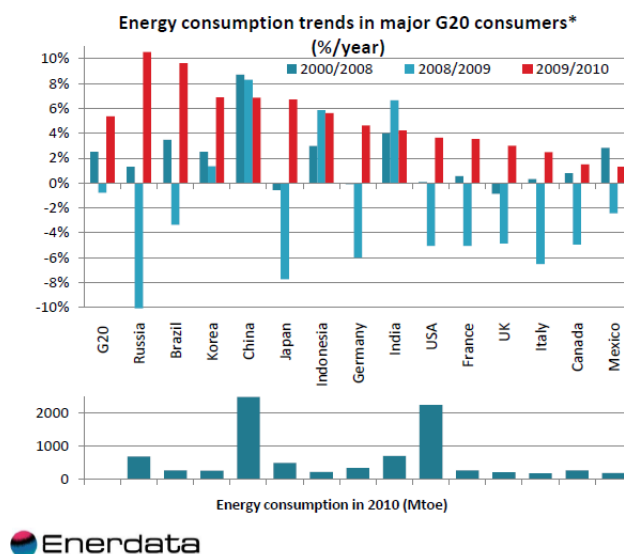
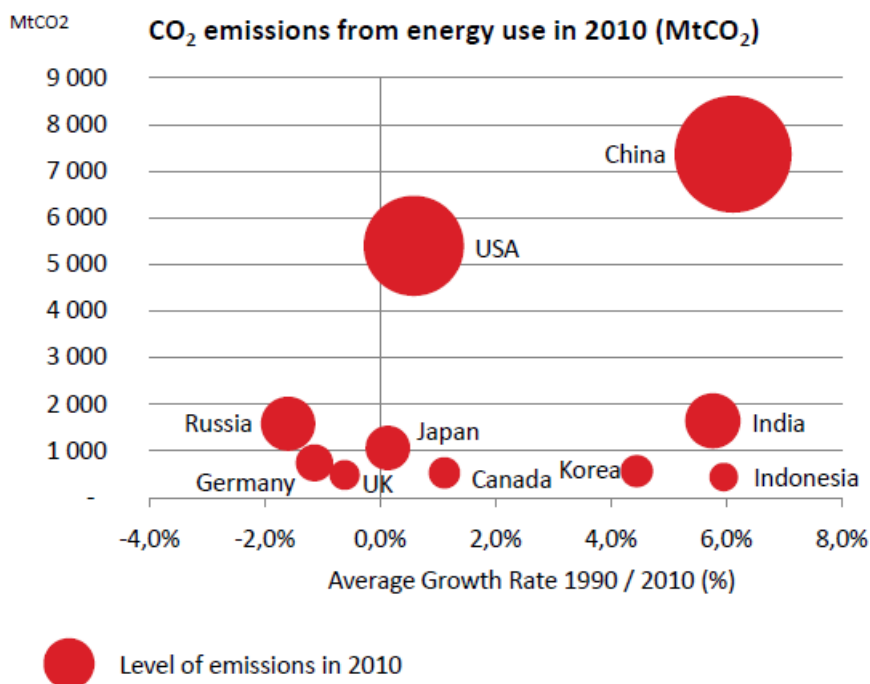


Figura 1.1: *Consumo energetico dei 20 maggiori consumatori al mondo*

in quanto sono rilasciate nella parte alta dell'atmosfera [2] Per farsi un'idea dei consumi e delle emissioni dovute al mantenimento e utilizzo delle apparecchiature elettroniche [3] si pensi che:

- ogni PC genera 1 tonnellata equivalente di CO<sub>2</sub> all' anno e che un server consuma energia per la cui produzione viene emessa la stessa quantità di CO<sub>2</sub> prodotta da un SUV che percorre 25 km;
- un moderno server blade consuma circa 1 kW, tanto quanto il frigorifero di casa. Conseguentemente, un rack di server blade, per esempio, formato da 5 scaffali con 8 unità ciascuno, consuma 40 KW, l'equivalente di una palazzina;
- Un data center di medie dimensioni consuma circa 250 kW, come un quartiere, mentre i grandi data center, che per esempio, servono grosse banche o internet service provider, possono arrivare a consumare 10 MW, l'equivalente di una cittadina;
- Da una ricerca di Forrester Research un data centre con 1000 server utilizza in un mese una quantità di elettricità paragonabile a quella utilizzata in un anno da 16.800 persone.





 Enerdata

Figura 1.2: *Emissioni di CO<sub>2</sub> da consumo energetico dei 20 maggiori consumatori al mondo*

- Il 60% delle strutture ICT usano meno della metà dello spazio di storage disponibile .
- Solo 1/5 delle strutture ICT ha delle policy che forniscano saving energetico.
- In UK le apparecchiature ICT consumano il 10% del consumo energetico del Paese.
- I data center provocano circa 1/4 delle emissioni globali del settore ICT.
- L' Epa (Agenzia di protezione dell' ambiente americana) ha stimato che dal 2000 al 2006 i consumi energetici dei data center sono cresciuti del 70%, raggiungendo negli Stati Uniti i 61 miliardi di KWh, con un costo associato

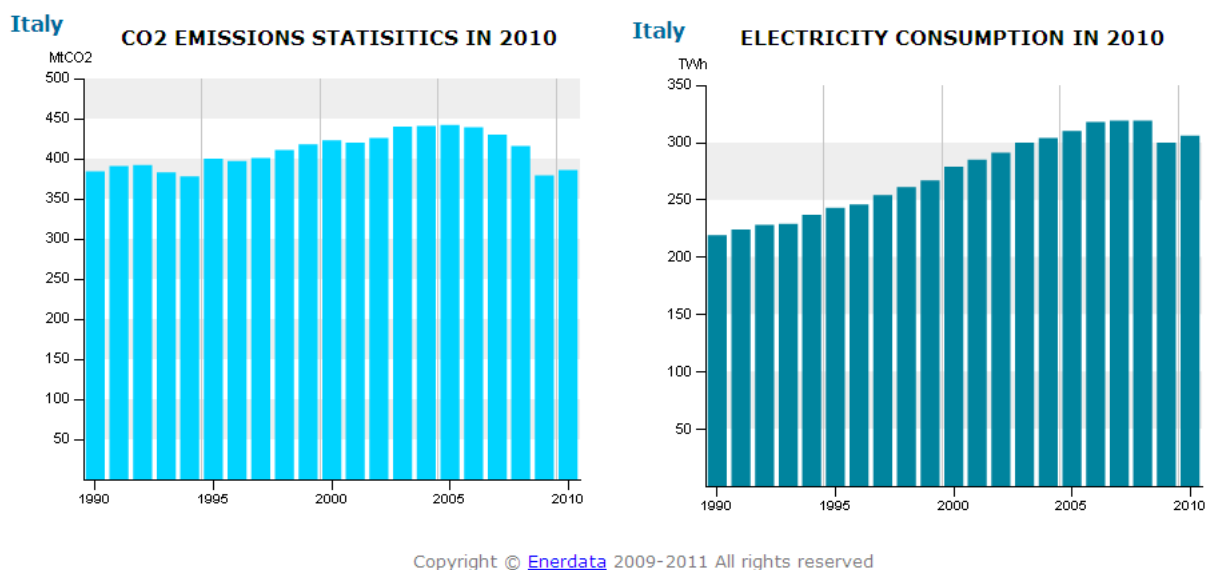


Figura 1.3: *Emissioni di CO<sub>2</sub> da consumo energetico e consumo energetico in Italia*

di 4,5 miliardi di dollari, ed è previsto un ulteriore aumento del 40% entro il 2020;

- 1000 PC in funzione 24 ore al giorno per 7 giorni alla settimana comportano un costo di elettricità annuo di circa £70,000 .

Fatta questa premessa generale diventa naturale considerare come l'aumento delle emissioni di anidride carbonica mondiale non sia più trascurabile. A questo proposito ci siamo occupati di considerare un aspetto molto importante del consumo dei data center: il costo energetico ed economico del mantenimento dell'impianto di condizionamento. Infatti il risparmio derivante da una gestione efficace dell'impianto di raffreddamento , secondo uno studio pubblicato da HP e Uptime Institute [4], comporta fino ad un risparmio pari al 60-70%. L'utilizzo nei data center è stato concentrato nell'ultimo decennio sullo sfruttamento massimo dei server fisici, portando quindi un minore spreco di apparecchiature. Questo comportamento è stato permesso da due fattori: da una parte la presenza diffu-

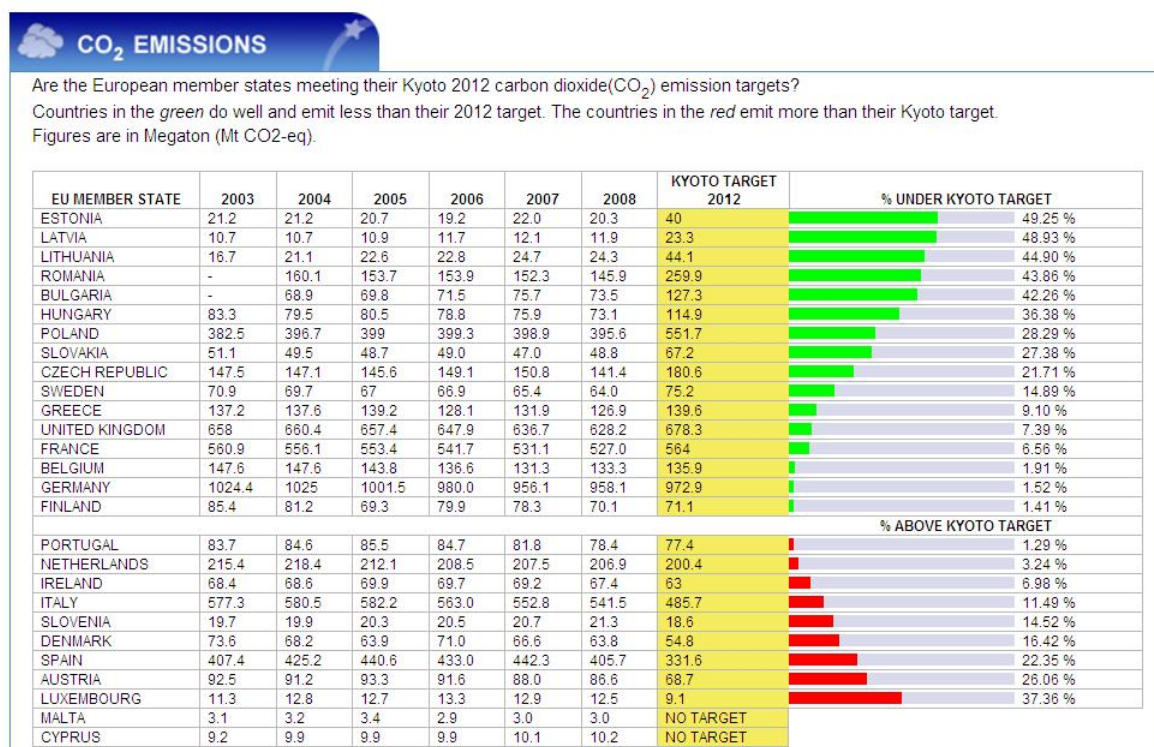


Figura 1.4: *Emissioni di CO<sub>2</sub> stimate per l'anno 2012 in Italia*

sa sul mercato di apparecchiature via via più potenti, dall'altra da una crescente attenzione per i consumi. Infatti la diffusione di apparecchiature potenti ed energy aware ha permesso una server consolidation sempre più importante negli anni. Inoltre spesso ci si trova in presenza di carichi computazionali dinamici che portano, se non gestiti in maniera adeguata, una disomogeneità temporale e spaziale all'interno del data center. Queste zone molto calde possono arrecare danni alle apparecchiature e, allo stesso tempo, necessitano di un maggiore sforzo di potenza da parte degli apparati di condizionamento per riportare la temperatura della sala ad una condizione di equilibrio. Si è parzialmente risolto questo problema introducendo all'interno delle sale server dei raffrescatori molto importanti dal punto di vista della portata d'aria, che permettono di alleviare le temperature degli *hot spot*. La capacità di raffrescamento di questi apparati (CRAC-*Computer Air Room Conditioner*) è spesso sovradimensionata: questo fenomeno comporta

uno spreco di energia inutile e inadeguato. Ne deriva che una gestione *efficiente* degli apparati di condizionamento garantisca, innanzitutto, inutili sprechi di energia che possono incidere in maniera pesante sul bilancio energetico ed economico di un data center. Essa inoltre permette il mantenimento accurato e adeguato delle apparecchiature, la cui sostituzione dovuta a guasti per eccessivo sovraccarico termico comporterebbe uno spreco economico inutile.

Il lavoro di tesi ha l'obbiettivo di stimare in maniera semplice e accurata quale sia l'effetto termico su tutti i server presenti in un data center, dello spegnimento delle ventole di raffreddamento di una quota parte dei server, quando sono inutilizzati e la loro potenza assorbita è nulla.

# Capitolo 2

## I lavori precedenti in ambito e lo stato dell'arte

Le pubblicazioni riportate in questa sezione costituiscono lo stato dell'arte del mio lavoro di tesi. Ritengo che questo approccio, che ho incontrato in altri lavori di tesi da me consultati, sia efficace: in quanto risulta chiaro e di facile consultazione.

### **2.1 Sensor-based fast thermal evaluation model for energy efficient high-performance data centers**

In [5] questo lavoro viene proposto un modello astratto del flusso di calore che utilizza informazioni da sensori *onboard* e ambientali, che caratterizza il ricircolo d'aria sulla base delle informazioni acquisite dai sensori e accelera il processo di valutazione termica per data center ad alte performance. Questo è un aspetto critico in ambito alla minimizzazione dei costi energetici, all'ottimizzazione delle risorse computazionali e alla massimizzazione della capacità computazionale di un data center. A partire da un profilo di carico e da un profilo termico, ottenuti da vari sensori distribuiti, viene predetta la conseguente distribuzione di temperatura in maniera accurata e veloce, tenendo conto della caratterizzazione del ricircolo

dato dalla topologia di un data center. I risultati delle simulazioni confermano l'ipotesi fatta, cioè che il ricircolo di calore può essere caratterizzato dalla *cross interference* presente nel modello del flusso di calore. Quindi valutazioni termodinamiche veloci, basate sulla *cross interference*, possono essere utilizzate per la gestione termica nella predizione della distribuzione di temperatura in tempo reale.

## 2.2 Thermal-aware task scheduling for data centers through minimizing heat recirculation

Le condizioni termiche all'interno di un data center giocano un ruolo fondamentale per l'efficienza e l'affidabilità dello stesso. Un problema piuttosto rilevante per il controllo dell'efficienza del *cooling* è il controllo del ricircolo dell'aria all'uscita e all'ingresso di ogni nodo presente. Il calore generato da ogni nodo dipende dal tipo di carico del nodo e dal suo "power profile". Il contributo di questa pubblicazione permette di generare uno scheduling che assegni il carico in arrivo in modo tale da mantenere la temperatura in ingresso ai nodi, più costante possibile. Questo permette un buon risparmio energetico a livello di impatto sull'impianto di condizionamento. Sulla base dell'utilizzo dei *coefficienti di cross interference* utilizzati per la descrizione del ricircolo dell'aria all'interno di un data center, l'algoritmo di scheduling, *XInt*, minimizzando  $T_{in}$  introduce un ricircolo minore e un costo energetico minore per ogni allocazione fatta all'interno del data center.

*XInt* permette di avere una distribuzione di  $T_{in}$  inferiore rispetto ad altri approcci di 2-5 °C e un risparmio del 20-30% per un utilizzo moderato del data center. Il contributo di questo lavoro è triplice:

- caratterizza e quantifica il ricircolo d'aria in termini di cross interference
- formalizzazione matematica della minimizzazione del costo energetico di un data center come problema di minimizzazione del ricircolo e minimizzazione della temperatura in ingresso ai server

- sviluppo di un algoritmo di scheduling *thermal-aware task-oriented* invece di workload-oriented e power-oriented sulla base della minimizzazione della cross interference.

La trattazione di occupa dell'analisi di ambienti di super calcolo (High Performance Computing). All'interno di questi ambienti molti server lavorano contemporaneamente per lassi di tempo molto lunghi. Per dare un'idea della portata del lavoro cui ci stiamo riferendo, una simulazione di un circuito *Spice* potrebbe utilizzare per giorni in parallelo centinaia di server. Un data center di 2000 server, per esempio, potrebbe essere utilizzato al 10% della sua capacità: questo significa che vengono utilizzati 200 processori contemporaneamente. In ambienti chiusi, come un data center, sono necessari dai 10 ai 20 minuti affinché la temperatura all'interno ritorni stazionaria. Quindi si assume che il data center mantenga una configurazione di potenza stabile per un tempo necessario da permettere alla temperatura di stabilizzarsi.

Ogni data center viene rappresentato come un insieme di  $n$  nodi (chassis). Ogni nodo  $i$  consiste di  $m$  server (blade). Ogni nodo  $i$  aspira aria al suo interno  $T_{in}^i$  e dissipa calore nell'aria in uscita, che ha una temperatura  $T_{out}^i$ . L'aria in uscita dal nodo deriva dalla temperatura dell'aria che esce da ogni server all'interno del nodo, dall'aria fornita dal condizionatore e dal ricircolo d'aria calda fornito da ogni altro nodo. Per il principio di conservazione dell'energia la quantità di calore fornita da un flusso d'aria nell'unità di tempo è definita da:

$$Q = \rho \cdot f \cdot C_p \cdot T \quad (2.1)$$

dove  $\rho$  è la densità dell'aria,  $f$  la portata del flusso d'aria,  $C_p$  il calore specifico dell'aria e  $T$  la temperatura dell'aria. Siccome ogni nodo è unico nella sua posizione all'interno del data center supporremo che il flusso d'aria differisca per ogni nodo. A partire dal fatto che la potenza assorbita da un apparecchio elettronico viene dissipata in calore la relazione tra la temperatura in ingresso di un nodo e la sua potenza assorbita è:

$$P_i = \rho \cdot f_i \cdot C_p \cdot (T_{out}^i - T_{in}^i) \quad (2.2)$$

quindi:

$$T_{out}^i = T_{in}^i + K \cdot P_i \quad (2.3)$$

dove

$$K_i = \rho \cdot f_i \cdot C_p \quad (2.4)$$

Quindi il consumo di potenza nel nodo  $i$  comporta un aumento del flusso d'aria nel nodo che fornisce un aumento di temperatura tra  $T_{in}^i$  e  $T_{out}^i$ .

Sulla base della descrizione del flusso di calore presente nel lavoro precedente nello stato dell'arte, il ricircolo di calore può essere descritto tramite i coefficienti della matrice di *cross interference* che denota quanto ogni nodo concorra alla variazione del flusso di calore di ogni altro nodo. Se le costanti  $K_i$  sono organizzate in matrici diagonali,

$$\mathbf{K}_{n \times n} = \text{diag}(K_1, K_2, \dots, K_n) \quad (2.5)$$

dal lavoro precedente si ha che il vettore delle temperature in ingresso possono essere espresse come:

$$\vec{\mathbf{T}}_{in} = \vec{\mathbf{T}}_{sup} + [(\mathbf{K} - \mathbf{A}^T)^{-1} - \mathbf{K}^{-1}] \cdot \vec{\mathbf{P}} \quad (2.6)$$

Detta:

$$\mathbf{D} = [(\mathbf{K} - \mathbf{A}^T)^{-1} - \mathbf{K}^{-1}] \quad (2.7)$$

si ha che:

$$\vec{\mathbf{T}}_{in} = \vec{\mathbf{T}}_{sup} + \mathbf{D} \cdot \vec{\mathbf{P}} \quad (2.8)$$

dove si denota che la temperatura in ingresso è apri a quella dell'aria fornita dal condizionatore, alla quale si aggiunge la quota di ricircolo. Si evince che la riga in DP con il valore massimo fornisce la riga con il massimo in  $T_{in}$ . Si procede poi alla descrizione del legame tra le caratteristiche del task in arrivo alla sua necessità di potenza del nodo assegnato, questo viene detto *power profile*. Viene



poi definito come il vettore delle temperature d'ingresso dipendono dal *placing* del job all'interno del data center, un'ultima parte permette di legare la temperatura del condizionatore alla temperatura in ingresso ai nodi.

Questo viene tradotto nell'ottimizzazione del seguente problema:

$$\begin{aligned}
& \text{minimize}(\max\{T_{in}^i\}) & (2.9) \\
& \text{st} : C_{tot} - \sum_{j=1}^n C_j = 0 \\
& : \vec{T}_{in} = \vec{T}_{sup} + \mathbf{D}[a, a, \dots a]^T + \mathbf{D} \cdot \vec{\mathbf{C}} \cdot b \\
& : C_j \geq 0, j = 1..n, \\
& : m - C_j \geq 0, j = 1..n.
\end{aligned}$$

che intuitivamente rappresenta la decisione di come suddividere il carico in modo da minimizzare la temperatura massima in ingresso ai nodi. Data questa descrizione dello scenario il problema diventa quindi la minimizzazione del picco di temperatura massima in ingresso come ILP. XInt utilizza un algoritmo di ottimizzazione genetico per fornire lo scheduling più possibile vicino all'ottimo: è un algoritmo di ottimizzazione stocastico che simula il processo di evoluzione in natura: la sopravvivenza e la mutazione del più forte. XInt permette, a carichi moderati di ottenere un risparmio energetico pari al 20-30%.

## 2.3 PowerNap: eliminating server idle power

La pubblicazione [6] propone un metodo per il risparmio energetico dei server nel quale l'intero sistema transita rapidamente tra uno stato attivo di alta performance ad uno idle nel quale il consumo di potenza è prossimo allo zero in risposta ad istantanee variazioni di carico. Al contrario del comune approccio in cui si cerca il corretto bilanciamento tra diversi livelli di potenza in corrispondenza a diversi livelli di carico per ogni componente del sistema, PowerNap si incentra sulla minimizzazione della potenza di idle e del tempo necessario per la transazione tra i

due stati, visto che i server hanno un utilizzo inferiore al 20% durante la maggior parte del tempo in cui vengono utilizzati.

PowerNap si concentra su alcuni meccanismi tali da eliminare gli sprechi di potenza in idle e rivolge la sua attenzione alle regioni di bassa efficienza degli alimentatori dei blade server. A questo scopo è stato introdotto l'approccio *Redundant Array for Inexpensive Load Sharing* (RAILS) per la power delivery. Il concetto alla base di questo approccio è la condivisione del carico tra diverse PSU di piccole dimensioni e poco costose, con lo scopo di avere maggiore affidabilità e maggiore efficienza rispetto a quelle più costose.

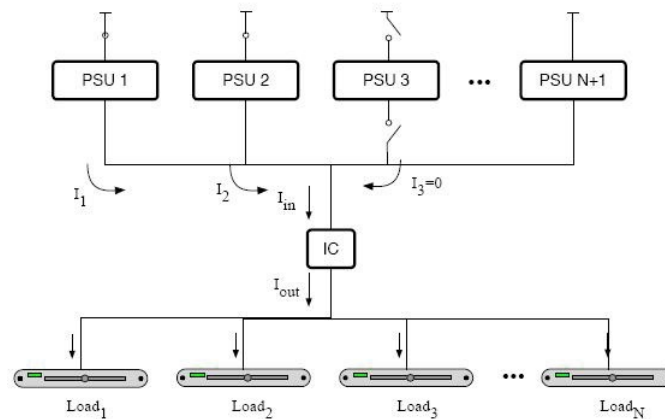


Figura 2.1: *Descrizione logica funzionamento di RAILS. Permette di far lavorare le PSU nella loro zona di maggior efficienza*

Lo schema logico è fornito in figura 2.1. Avendo a disposizione diverse PSU in parallelo, un circuito integrato permette di far lavorare le PSU nella loro zona di maggiore efficienza (cioè con carichi maggiori del 40%, mantenendo staccate quelle non necessarie).

PowerNap ha un funzionamento logicamente molto semplice: quando un server ha elaborato tutto il carico assegnatogli, il suo stato *attivo*, passa in *nap*. Questo stato presuppone che tutte le sue componenti passino in uno stato "dormiente, stato nel quale il consumo di energia delle componenti è pressoché nullo e non

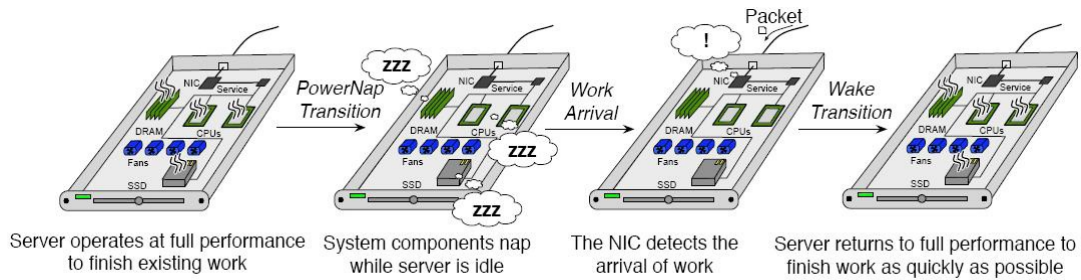


Figura 2.2: Descrizione logica funzionamento di PowerNap: quando un server ha elaborato tutto il carico assegnatogli, il suo stato attivo, passa in nap

è possibile svolgere alcun tipo di elaborazione. Insomma le componenti perdono momentaneamente la loro capacità computazionale.

I soli componenti che sono *sempre vigili* sono quelli che permettono l'individuazione di nuovi job in arrivo e controllano lo scadere di eventuali timer software. All'arrivo di un nuovo job, il controllore rimasto vigile, riporta il sistema in attività permettendo l'elaborazione del nuovo job, al termine del quale il sistema ritornerà nello stato *nap*. Questa impostazione del problema presuppone solamente due stati operativi: attivo (performance massime) e *nap* (minimo consumo di energia). Questa pubblicazione è stata citata come argomento di introduzione allo studio degli stati termo-meccanici di un server.

## 2.4 Cooling-aware workload placement with performance constraints

Questo lavoro [7] propone uno sfidante problema di ottimizzazione, detto cooling-aware workload placement problem, CWPP, che ha lo scopo di trovare un modello di placement di workload, che ottimizzi il globale consumo di un data center dato dalla somma del consumo del server e dal consumo dell'impianto di condizionamento. Il problema viene formulato come un Mixed Integer Non Linear Problem utilizzando la matrice di *cross interference* che collega il placement del carico alla temperatura dell'aria fredda. Poiché lo stato dell'arte dei solver per Mixed Integer

Non Linear fornisce metodi per la risoluzione ottimale solo per problemi piccoli, abbiamo utilizzato due euristiche, per ottenere una migliore soluzione: (i) un algoritmo euristico basato sul rilassamento lineare del problema, e (ii) un algoritmo Variable Neighborhood Search. Entrambe le euristiche sono valutate rispetto al migliore limite inferiore ottenuto con un solver Mixed Integer Non Linear. I risultati computazionali hanno mostrato che entrambe le euristiche forniscono soluzioni che hanno un piccolo errore percentuale rispetto alla soluzione ottimale.

## **2.5 Modelling and managing thermal profiles of rack-mounted servers with thermoStat**

Densità di potenza molto alte e temperature molto alte alle quali lavorano le componenti, comportando un rischio di rottura, sono i fattori chiave del concetto di *temperature-aware computing*, studiato dagli autori in [8]. Le architetture dei calcolatori e i progettisti dei sistemi software necessitano una migliore comprensione delle opzioni proposte, e lo sviluppo di tecniche per abbassare la temperatura di lavoro in modo da ridurre la possibilità di *failure* temporanea e permanente. Fino a poco tempo fa gli strumenti per delineare l'andamento della temperatura sono stati confinati al mondo industriale per lo studio della gestione e della compartimentazione dei flussi d'aria, con poche porte aperte al mondo accademico.

Lo sviluppo di questi *tool* è un lavoro piuttosto difficoltoso in quanto richiede una conoscenza trasversale tra: architetture, sistemi software, termodinamica e sistemi di raffreddamento. Poiché è stata riconosciuta una certa importanza a questo campo di studio ci sono stati diversi lavori sulla modellizzazione di temperature di processori a livello micro-architetturale che possono essere facilmente compresi e utilizzati da architetti informatici per la progettazione dei processori. Questa pubblicazione presenta uno strumento di modellizzazione termica basata su CDF 3D, detto *Thermostat*, implementato per sistema di server rack. Utilizzando questo modello è stato implementato un sistema di 20 nodi server rack, e validato con oltre 30 sensori di temperatura montati a livelli diversi del rack.

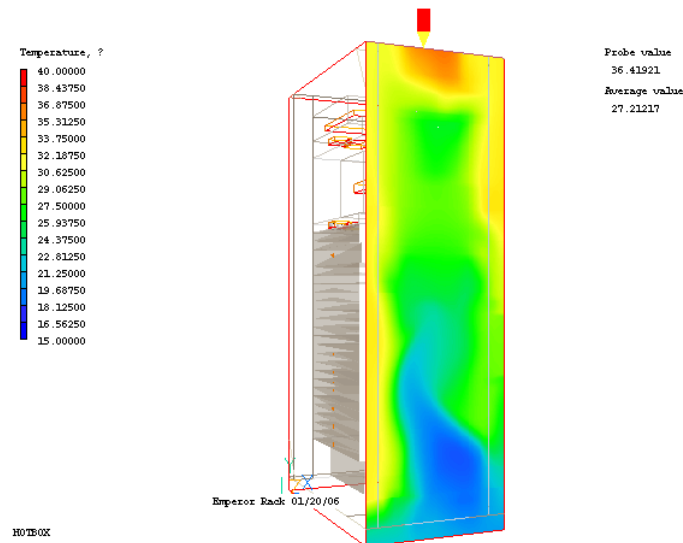


Figura 2.3: *Mapa termica, dall'esterno di un rack server*

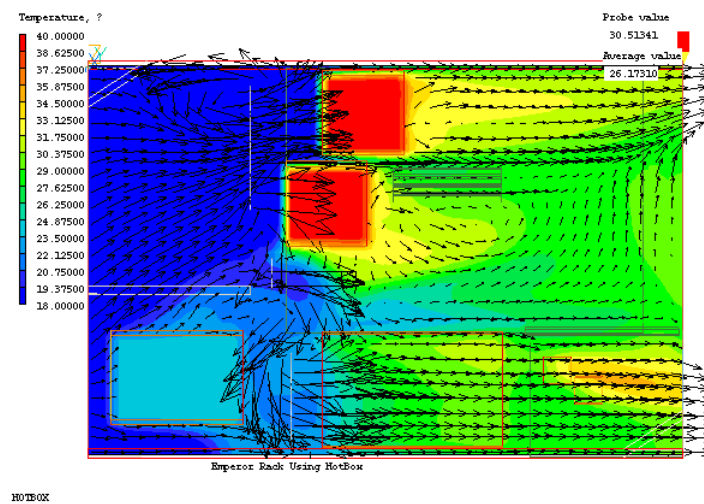


Figura 2.4: *Mapa termica dell'interno di un server x335 Server Box*

Sono stati eseguiti numerosi esperimenti con questo tool per dimostrare come le diverse condizioni di carico influenzino il profilo termico e come questo tool possa essere d'aiuto negli strumenti di gestione dinamica della progettazione termica

degli ambienti.

## 2.6 Trends and effects of energy proportionality on server provisioning in data centers

Il *cloud* rappresenta oggi l'infrastruttura di base più largamente diffusa per i servizi web su larga scala. Questo lavoro si pone l'obiettivo di studiare quale sia l'effetto della *energy proportionality* sul risparmio energetico della gestione di un data center di tipo cloud sulla base di precise configurazioni di potenza e di apparecchiature. Il nostro studio ha dimostrato che sebbene sia convinzione comune che l'aumento della *energy proportionality* corrisponda ad una diminuzione dei benefici della gestione di potenza della *server provisioning*, non sempre questo è vero. Infatti introdurre sulle apparecchiature strumenti per la sensibilità termica può essere una buona norma per la gestione e il controllo dei fenomeni di ricircolo dei flussi caldi nel caso di eterogeneità dei consumi di potenza.

## 2.7 Effect of transient boundary conditions and detailed thermal modeling of data center rooms

Con il sempre maggiore aumento della quantità di calore dissipata dalle componenti hardware dei computer, la capacità di un'ottima progettazione delle apparecchiature di raffreddamento diventa di fondamentale importanza. In molti casi si è fatto uso di computazioni fluido dinamiche per fornire informazioni ambientali sui data center. Rimane il fatto che la stragrande maggioranza degli studi termici, oggi, sono condotti in condizioni di stazionarietà. Questo comporta che i cambiamenti delle configurazioni hardware e nelle risorse di raffreddamento, difficilmente sono rilevati nella stima della temperatura in ingresso e del flusso d'aria in ingresso ai rack. Questo lavoro [9] introduce un modello dinamico per la gestione di assorbimenti di potenza e flussi d'aria fredda, forniti dal condizionamento, variabili. Questo modello che descrive gli stati intermedi delle configurazioni ter-

modinamiche aumenta la capacità di monitoraggio di quei flussi che, altrimenti, porterebbero ad un livello di condizionamento insufficiente al raffreddamento dell'ambiente. Un altro obiettivo di questo lavoro è la dimostrazione che sia utile fissare delle curve termiche caratteristiche all'interno dei CRAC (Computer Room Air Conditioning), infatti viene dimostrato come sia impossibile mantenere fissa la temperatura dell'aria fornita dal condizionatore.

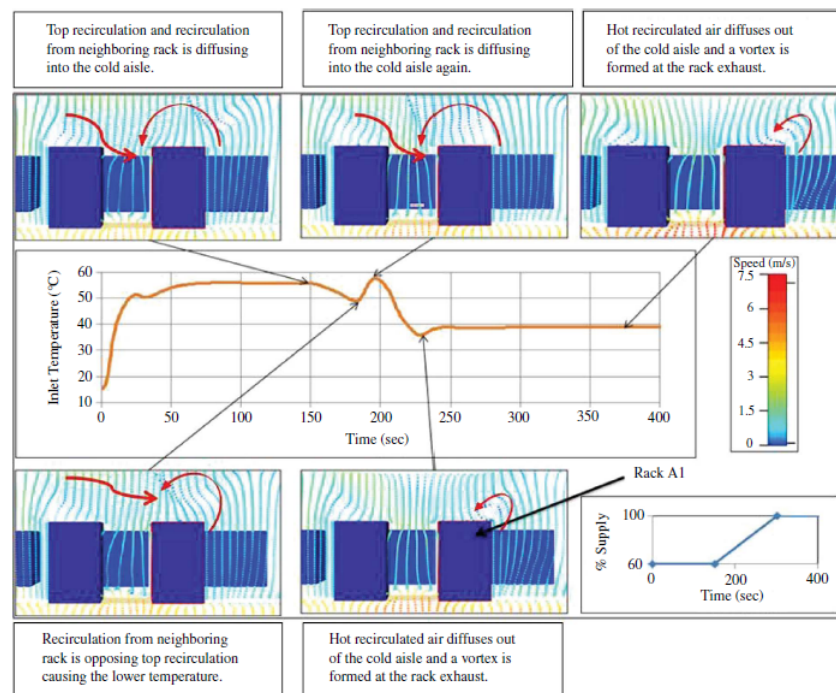


Figura 2.5: Caso particolare dello studio: data una particolare configurazione di CRAC e data un particolare posizione dei rack nella sala, si nota il cambiamento del ricircolo intorno al rack che segue le fluttuazioni della temperatura in ingresso

## 2.8 The superposition technique for thermal management

L'accuratezza della predizione della temperatura nei sistemi ingegneristici è una sfida piuttosto importante, in quanto deve far fronte a molti fattori, tra cui i moti

convettivi, condizioni termiche al contorno non uniformi, ambienti di estrapolazione dei dati poco accurati e necessità di fornire stabilità alla soluzione. L'aumento della dissipazione del calore in sistemi di piccole dimensioni, necessita soluzioni con sempre maggior trasferimento di calore. L'analisi termica e la predizione basata sul *principio di sovrapposizione degli effetti* non è così largamente diffusa come altri metodi di analisi numerica: essa è una valida e solida alternativa agli strumenti di analisi numerica, soprattutto data la complessità crescente di alcuni scenari. Il *principio di sovrapposizione degli effetti* per la stima della temperatura necessita di gestire equazioni e condizioni al contorno che siano lineare e omogenee in temperatura. L'equazione di trasporto dell'energia per moti convettivi forzati e l'equazione del calore rispettano questa esigenza, come pure le proprietà e il flusso del campo non sono funzioni della temperatura e le condizioni al contorno comprendono solo la temperatura, il flusso di calore, e o la convezione. Se la propagazione dei flussi fosse stata solo naturale, siccome non sono descrivibili tramite un modello lineare, non sarebbero stati descrivibili tramite il *principio di sovrapposizione degli effetti*. In[10] viene descritto come alcuni fenomeni di propagazione forzata del calore possano essere stimati tramite questo principio, fatte le opportune valutazioni iniziali.



# Capitolo 3

## Impostazione del problema di ricerca

L'obiettivo preposto al lavoro di tesi è una buona gestione e previsione dei flussi d'aria all'interno di un data center. Per fare questo abbiamo considerato un modello lineare del flusso di calore che ci permetta di descrivere l'effetto dello spegnimento delle ventole di un server e collegarlo al suo impatto sull'impianto di condizionamento.

### 3.1 Modello del flusso di calore

Consideriamo un data center composto da un set di  $N$  nodi che, fisicamente separati, collaborano per eseguire i task assegnati. La potenza consumata da ogni nodo dipende, tramite una funzione termo-meccanica, che a sua volta dipende dalle specifiche dell'hardware, dal tipo di carico assegnato. La potenza consumata da ogni nodo viene quasi completamente dissipata in calore. La relazione tra consumo di potenza del nodo e temperatura in ingresso/uscita dal nodo può essere descritta come pubblicato in [11].

$$P_i = \rho f_i C_p (T_{\text{out}_i} - T_{\text{in}_i}) \quad (3.1)$$

dove

- $C_p$  è il calore specifico dell'aria
- $\rho$  la sua densità.

Ne deriva che il consumo di potenza di un nodo ne fa variare i parametri di temperatura in ingresso e in uscita. L'aria calda generata da ogni nodo si diffonde sia verso gli altri nodi, sia verso il nodo stesso, come in figura 3.1.

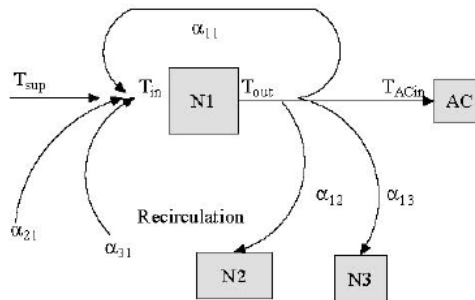


Figura 3.1: *Descrizione logica del coefficiente di cross interference tra nodi distribuiti*

Per quanto riguarda la determinazione delle temperature in ingresso e in uscita da ogni nodo dello scenario che consideriamo, abbiamo seguito l'approccio descritto in [5] e [12]. Queste dipendono da due coefficienti che sono stati definiti:

- *self-interference*: ricircolo di aria calda da un nodo verso sé stesso
- *cross interference*: ricircolo di aria calda da un nodo verso tutti gli altri nodi.

La descrizione dei flussi d'aria all'interno di una sala server è piuttosto complessa, quindi abbiamo fatto alcune ipotesi. Innanzitutto abbiamo ipotizzato che tutti gli oggetti fisici all'interno del data center siano fissati: in queste condizioni il modello di comportamento del flusso d'aria utilizzato è considerato stabile e predicibile. Abbiamo anche ipotizzato che la quantità d'aria in uscita da un nodo sia stabile all'ingresso del nodo successivo. I parametri utilizzati nel modello sono indicati in figura 3.1, dove si vede come la  $T_{in}$  del nodo N1 dipenda dalla temperatura dell'aria fornita dal condizionatore  $T_{sup}$ , che è stata fissata pari a  $283K$

e dall'aria che ricircola dagli altri nodi. La  $T_{out}$  dal nodo invece dipende dalla temperatura in ingresso al nodo,  $T_{in}$ , e dalla dissipazione di calore della potenza del nodo. Nel nostro modello la temperatura del condizionatore è stata mantenuta fissa, sono però possibili altri approcci (paragrafo 1.7).

Definita la quantità potenza termica o *heat rate* come

$$Q = \rho f C_p T \quad (3.2)$$

sia la potenza termica in uscita dall'i-esimo, nodo espressa come

$$Q_{out}^i = Q_{in}^i + P_i = \rho f_i C_p T_{out}^i \quad (3.3)$$

dove

- $Q_{in}^i$  è l'*heat rate* in ingresso all'i-esimo nodo
- $P_i$  è la potenza consumata dall'i-esimo nodo.

Posso così definire la potenza termica in ingresso,  $Q_{in}^i$ , come:

$$Q_{in}^i = \rho f_i C_p T_{in}^i \quad (3.4)$$

dove

- $T_{in}^i$  la temperatura in ingresso all'i-esimo nodo.

La distribuzione della temperatura all'interno della sala dipende dalle distribuzioni di  $T_{out}$  e  $T_{in}$  all'interno del nodo. La  $T_{in}$  dipende dalla  $T_{sup}$  e dalle quote parti di ricircoli dell'aria degli altri nodi e di sé stesso. La  $T_{out}$  invece dipende dalla  $T_{in}$  e dalla dissipazione della potenza consumata dal nodo. Il ricircolo, come già sopra accennato, viene descritto in [5] dalla matrice di *cross interference*  $A$ : ciascun elemento  $\alpha_{i,j}$  della matrice indica il contributo  $Q_{out}^i$  di calore di ogni nodo  $i$  in ingresso ad ogni altro nodo  $Q_{in}^j$ .

Il calore  $Q_{in}^i$  portato dal flusso d'aria in ingresso, composto dall'aria fornita dal condizionatore e dall'aria calda di ricircolo può essere decomposto in una somma di "sotto flussi"  $\sum_{j=1}^n \alpha_{j,i} Q_{out}^j + Q_{sup}^i$ , così l'*heat rate* in ingresso diventa:

$$Q_{out}^i = \sum_{j=1}^n \alpha_{j,i} Q_{out}^j + Q_{sup}^i + P_i = \sum_{j=1}^n \alpha_{j,i} \rho f_j C_p T_{out}^j + Q_{sup}^i + P_i. \quad (3.5)$$

Il flusso d'aria totale che ricircola nel nodo  $i$  è  $\sum_{j=1}^n \alpha_{j,i} f_j$ , quindi  $f_i - \sum_{j=1}^n \alpha_{j,i} f_j$  è il flow rate del flusso d'aria fredda fornito dal nodo  $i$ , e di conseguenza  $Q_{sup}^i = \rho \cdot (f_i - \sum_{j=1}^n \alpha_{j,i} f_j) C_p T_{sup}$ . Quindi otteniamo:

$$Q_{in}^i = \sum_{j=1}^n \alpha_{j,i} \rho f_j C_p T_{out}^j + \rho \left( f_i - \sum_{j=1}^n \alpha_{j,i} f_j \right) C_p T_{sup} \quad (3.6)$$

Considerando 3.3 e sostituendo  $\rho f_i C_p$  con  $K$ , per il nodo  $i$  si ottiene:

$$K_i T_{out}^i = \sum_{j=1}^n \alpha_{j,i} K_j T_{out}^j + \left( K_i - \sum_{j=1}^n \alpha_{j,i} K_j \right) T_{sup} + P_i \quad (3.7)$$

In seguito per tutti i nodi da 1 a  $n$ , possiamo avere un gruppo di equazioni lineari presentate in forma di equazione matriciale:

$$\mathbf{K} \cdot \vec{\mathbf{T}}_{out} = \mathbf{A}' \cdot \mathbf{K} \cdot \vec{\mathbf{T}}_{out} + \mathbf{K} \cdot \vec{\mathbf{T}}_{sup} - \mathbf{A}' \cdot \mathbf{K} \cdot \vec{\mathbf{T}}_{sup} + \vec{\mathbf{P}} \quad (3.8)$$

dove  $\mathbf{A}'$  è la matrice trasposta di  $\mathbf{A}$ , e la matrice diagonale  $\mathbf{K}$  è definita come:

$$\mathbf{K} = \begin{vmatrix} K_1 & 0 & \dots \\ 0 & K_2 & \dots \\ \dots & \dots & \dots \end{vmatrix} \quad (3.9)$$

e i vettori colonna  $\vec{\mathbf{T}}_{out}$ ,  $\vec{\mathbf{T}}_{sup}$  e  $\vec{\mathbf{P}}$  sono definiti rispettivamente come:

$$\begin{pmatrix} T_{out}^1 \\ T_{out}^2 \\ \dots \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} T_{sup}^1 \\ T_{sup}^2 \\ \dots \end{pmatrix} \text{ e } \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \dots \end{pmatrix} \quad (3.10)$$

L'equazione 3.8 può essere scritta anche come:

$$\mathbf{K} \cdot \left( \vec{\mathbf{T}}_{out} - \vec{\mathbf{T}}_{sup} \right) = \mathbf{A}' \cdot \mathbf{K} \cdot \left( \vec{\mathbf{T}}_{out} - \vec{\mathbf{T}}_{sup} \right) + \vec{\mathbf{P}} \quad (3.11)$$

La funzione descritta è definita *funzione di sistema* fornisce la rappresentazione matematica della correlazione tra le temperature in uscita, l'aria fornita dal CRAC, il consumo di potenza di tutti i nodi e i coefficienti di *cross interference*.

## 3.2 Disegno del layout target

### 3.2.1 Geometria

La geometria della sala server, si compone di 2 file, denotate con la lettera R, ciascuna composta da 5 rack. Ogni rack è contrassegnato con la lettera A, è alto 40U<sup>1</sup> e contiene al suo interno 4 nodi, ciascuna alta 10U, contrassegnata con la lettera S(S1,S2,S3,S4) e contenente fino a 16 server. All'interno dei server nel modello son state inserite delle ventole posizionate sulle facce calda e fredda dei nodi, al fine di facilitare al flusso d'aria che attraversa il nodo la prosecuzione verso l'esterno. Le ventole creano un flusso d'aria costante all'interno dei nodi a velocità  $v_s$ .

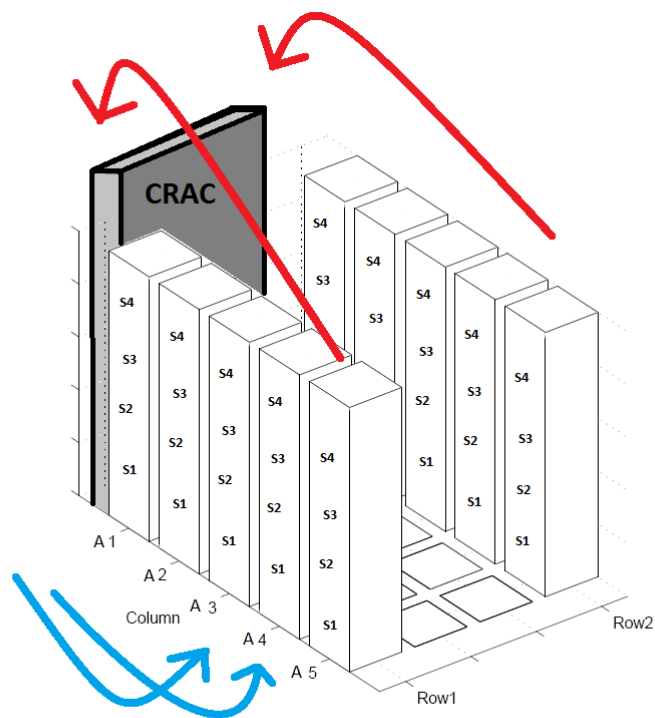


Figura 3.2: *La disposizione degli armadi di rack*

<sup>1</sup>1U = 1,75 pollici = 44,45 mm.

Dalle figure 3.2 e 3.3 è possibile definire la *gestione dei flussi d'aria* all'interno della stanza: il flusso freddo è fornito ai server da una zona posizionata al di sotto del pavimento tramite un condizionatore, indicato come CRAC (Computer Room Air Conditioner), che lo forza attraverso apposite griglie presenti sul pavimento all'interno del *corridoio freddo*. I server lo ricevono, cedono il calore da loro stessi dissipato, al flusso d'aria e lo re-immettono, scaldato all'interno del *corridoio caldo*, dal quale viene prelevato dal CRAC. Il CRAC procede a raffreddarlo e reimmetterlo in circolazione grazie alle griglie nel pavimento. L'aria fornita dal CRAC è erogata alla temperatura  $T_{sup}$  e ha una velocità fissata  $v_{cond}$ .

Il modello da noi utilizzato prevede una modifica rispetto al caso originale, in cui compariva un altro CRAC in posizione opposta rispetto ad esso. Per semplicità ne ho utilizzato uno solo.

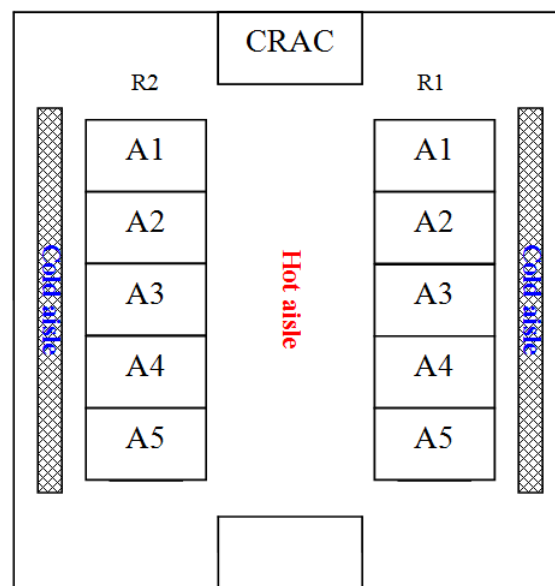


Figura 3.3: *Descrizione logica del DC visto dall'alto, dove si evidenziano i corridoi caldo e freddo*

### 3.2.2 Condizioni al contorno

Questo paragrafo è fondamentale all'interno della trattazione: descrive le condizioni al contorno. Queste sono descritte all'interno di un file di configurazione che prevede la possibilità di indicare l'assenza o la presenza, e in tal caso lo stato di funzionamento, della  $i$ -esimo nodo. Il file di configurazione, infatti, agisce sulle condizioni al contorno per descrivere lo stato di presenza/assenza dei nodi:

- *Assente*: le superfici di ingresso e uscita del nodo sono impostate a *wall*, cioè evitano il passaggio d'aria tra la parte interna (che è esclusa dal dominio di simulazione) e quella esterna;
- *Presente*: viene permesso il passaggio dell'aria attraverso le pareti del nodo. L'aria viene immessa nel dominio di simulazione con una velocità impostata, e la parete viene detta *velocity inlet*.

Vien poi definita la topologia della stanza tramite la diversa descrizione delle pareti della stanza. L'impostazione delle pareti può essere di tipo

- *wall*: le pareti sono considerate come fossero muro, quindi il flusso d'aria viene confinato all'interno della stanza;
- *periodic*: le pareti sono considerate come muri, ma la geometria della stanza è proposta in modo che sembri ripetersi più volte con le stesse caratteristiche. Questa impostazione, nel caso l'ambiente congeniale all'obiettivo fosse periodico, è molto utile in quanto permette di rendere più rapidi i tempi di simulazione.
- *symmetric*: le pareti della stanza impongono che la zona oltre la parete sia simmetrica rispetto a quella studiata.

In questo lavoro di tesi l'interesse si è focalizzato all'interno di una stanza: tutte le pareti sono impostate a *wall*, quindi il flusso d'aria che colpisce la superficie non l'attraversa. Altre caratteristiche definite in questo modello sono *no-slip*, cioè la velocità del flusso d'aria a contatto con la parete è nullo, e *adiabatica* che non implica scambio di calore tra i lati della parete.

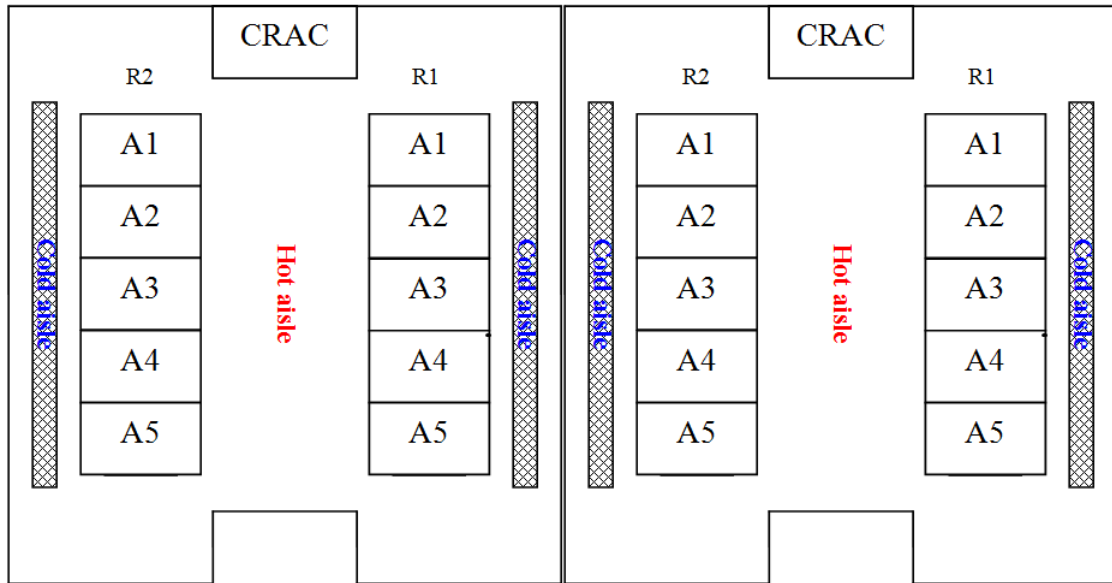


Figura 3.4: Descrizione logica del DC con boundary condition periodic

Infine le grate presenti sul pavimento, che permettono il passaggio dell'aria fredda erogata dal condizionatore, sono impostate nel modello come *interior*, cioè sono pareti fittizie che permettono il passaggio di fluido e vengono comunemente usate per reperire informazioni fisiche su quella superficie (es. temperatura, velocità, ...).

### 3.2.3 User Defined Function

Il modello del flusso di calore poco fa descritto impone il bilanciamento termico all'ingresso e all'uscita di ciascun nodo. L'interno dei nodi è *esterno al dominio di simulazione*, quindi è stato necessario implementare una *User Define Function* che permettesse di definire la temperatura in uscita dall' *i*-esimo nodo, in modo da garantire il bilancio energetico tra le parti. La temperatura in uscita è stata calcolata da *Fluent* tramite la relazione descritta nella 3.12.

$$T_{Out}^i = P_i/K_i + T_{in}^i \quad (3.12)$$



Il valore di temperatura in uscita presente qui sopra è stato considerato come il valore medio su tutte le celle d'ingresso, in quanto nella realtà il flusso d'aria non è perfettamente orizzontale a causa della presenza delle ventole, soprattutto a causa del fatto che il calore non è distribuito uniformemente all'interno del nodo stesso.

### 3.2.4 Parametrizzazione del modello del flusso di calore

I parametri necessari alla descrizione dell'ambiente nella definizione del modello del flusso di calore che sono stati usati sono qui sotto riportati:

- $c_p = 1006.43(\text{J/Kg} \cdot \text{K})$ ;  $\rho = 1.25(\text{Kg/m})$  ;
- $T_{sup} = 283 \text{ K}$  ;
- Velocità del flusso d'aria fornito dal condizionatore  $v_{cond} = 2.3 \text{ m/s}$  ;
- Velocità del flusso d'aria all'interno dell' *enclosure*  $v_s = 0.51 \text{ m/s}$  ;
- Accelerazione di gravità  $g = 9.8\text{m/s}^2$ .

Il flusso di calore all'interno dell'  $i$ -esimo nodo è stato così calcolato:  $f_i = v_s \cdot A_s \cdot \cos(\theta)$

dove  $A_s = 0.2925\text{m}^2$  è l'area attraversata dal flusso d'aria e  $\theta$  è l'angolo di incidenza del flusso sulla superficie. I flussi d'aria sono stati forzati perpendicolari alla superficie, quindi  $\theta = \pi/2$ , e  $\cos(\theta) = 1$ . Si ricava che  $f$  abbia un valore fisso  $f = 0.149175\text{m}^3/\text{s}$ , quindi  $K_i = 183.9143892 \text{ W/Kg}$ .

### 3.2.5 Data set simulation

Le simulazioni effettuate per creare il modello sono state impostate in modo tale che ogni nodo sia modulare alto 10U. Il numero massimo di server che può contenere è 16 server blade a mezza altezza, ciascuno dei quali consuma fino a 200 W. Il consumo dei server accesi all'interno di ogni scenario è stato impostato a valori diversi di potenza:

- 500 W
- 1000 W

Queste stime di carico rappresentano il range di funzionamento di un classico data-center che utilizzi, ad esempio, nodi corrispondenti ad una *enclosure* HP BladeSystem c7000 Enclosure, contenente 16 blade server ProLiant BL280c G6 <sup>2</sup>.

L'assorbimento massimo dell'*enclosure* sopra citata è di circa 2500 W a pieno carico, completo di tutte le blade. Poiché comunemente accade che non tutte le blade siano in attività (questo ci permette di considerare sia il caso in cui le blade siano installate ma non utilizzate, sia il caso in cui le blade non siano presenti), possiamo considerare le potenze  $P = 1000$  W e  $P = 1500$  W come consumi di potenza medi comuni per queste apparecchiature. Infatti spesso il consumo reale delle apparecchiature si colloca tra il 40-60% del consumo massimo.

I primi scenari che abbiamo simulato mantenevano N-1 nodi accesi con potenza  $P_b$  e uno spento ( $P_v = 0$  W) ma con ventole di raffreddamento funzionanti. Questo stato di spegnimento con ventole accese l'abbiamo chiamato *spegnimento parziale*. Abbiamo poi ripetuto gli scenari di simulazione imponendo che il nodo spento avesse le ventole di raffreddamento bloccate: questo stato di spegnimento è detto *spegnimento completo*. Utilizzando le configurazioni descritte abbiamo simulato la temperatura in ingresso e in uscita da ogni nodo per ogni singola simulazione. L'ordine che abbiamo utilizzato per imporre che l'i-esimo nodo fosse spento, in entrambe le modalità, è stato progressivo: a partire dalla fila più prossima al CRAC,3.3 fino al fondo e partendo dal basso verso l'alto, partendo dalla fila R1, la i-esimo nodo è stata posto  $P_v = 0$  W. Per capire quale fosse il comportamento delle ventole al crescere del consumo di potenza abbiamo considerato, oltre alle distribuzioni di potenza già definite, una distribuzione di potenza massima, all'interno della quale i nodi accesi consumano  $P = 2500$  W. Questo ci ha permesso di valutare il diverso comportamento dei flussi nel caso di potenza massima e minima.

---

<sup>2</sup>[http://www.spec.org/power\\_ssj2008/results/res2009q3/power\\_ssj2008-20090630-00173.html](http://www.spec.org/power_ssj2008/results/res2009q3/power_ssj2008-20090630-00173.html)

Caso	Pv	Pb	Ventole
1	500	0	OFF
2	2500	0	OFF
1vel	500	0	ON
2vel	2500	0	ON

Tabella 3.1: Casi simulati per la valutazione dell’impatto dello spegnimento delle ventole nei casi di potenza massima e minima

Per configurare ogni simulazione è stato utilizzato uno script eseguito in batch da *Fluent*<sup>3</sup>, all’interno del quale sono state settate la temperatura fornita dal condizionatore  $T_{sup}$ , impostata a 283 K, e le posizioni delle *enclosure* attive. Le potenze di funzionamento sono state impostate all’interno dell’ UDF (*User Defined Function*), la stessa che fornisce le temperature in uscita conseguenti la configurazione di potenza. Lo script di configurazione che viene letto da *Fluent* permette il salvataggio dei valori di temperatura *massima*, *minima* e *media* presenti su ogni faccia dell’ *enclosure*, e presenti sui lati rivolti verso il corridoio caldo e freddo. Il salvataggio avviene ogni 10 simulazioni. In seguito è stato inizializzato il simulatore settando un numero massimo di 2000 iterazioni. Al termine della simulazione i dati ottenuti sono stati salvati in modo da permettere l’elaborazione successiva dei dati. Le simulazioni sono state eseguite utilizzando, come già accennato, la versione parallela di *Fluent*, presente sul centro di super calcolo CILEA<sup>4</sup>, utilizzando il comando

$$fluent\ 3ddp\ -i\ simulate\ -t8\ -q\ fast\ -wt\ hours\ -o\ output$$

dove *3ddp* indica si simula un modello tridimensionale con doppia precisione, *simulate* è il nome del file che *Fluent* esegue, *8* è il numero di processi generati nella versione parallela, *output* è il nome del file in uscita che contiene l’output generato da *Fluent*. *fast* e *hours* sono parametri che indicano la priorità della coda

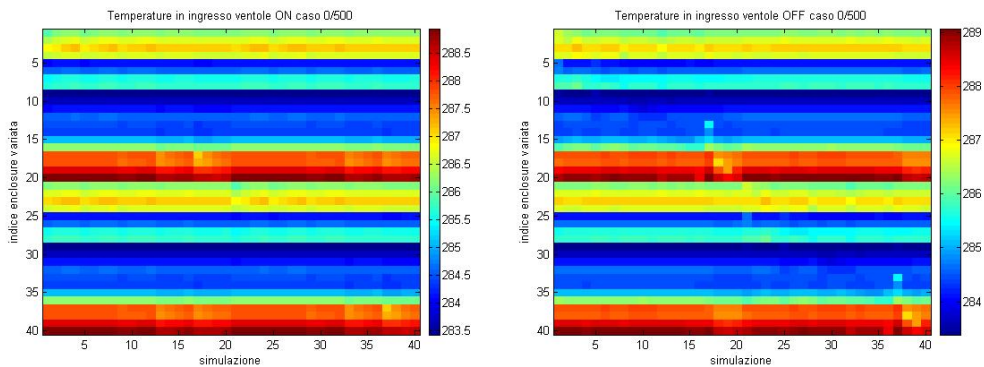
---

<sup>3</sup>[www.fluent](http://www.fluent)

<sup>4</sup>[www.cilea.it](http://www.cilea.it)

dei server del CILEA che ospita le simulazioni: sono simulazioni che terminano entro 24 ore, quindi sono inseriti nelle code a priorità maggiore.

Il numero di simulazioni effettuate per ogni caso è pari a  $N+1$ , dove  $N$  è il numero di nodi attivi. Poiché dai lavori precedenti in ambito si evince una leggera asimmetria del comportamento delle due file di armadi a causa probabilmente di piccoli errori presenti nelle simulazioni o nel modello, abbiamo ipotizzato che il comportamento tra le file di armadi sia *simmetrico*, quindi abbiamo generato la metà delle simulazioni e abbiamo considerato simmetriche le restanti. Ogni simulazione, che ci ha fornito la temperatura in ingresso e in uscita di ogni nodo nel caso in cui l'  $i$ -esimo nodo fosse spento, è stata descritta all'interno di un vettore colonna  $T_{in,off,1,(i)}$  dove il pedice 1 sta ad indicare il numero di nodi spenti per ogni simulazione, mentre il valore  $i$ , indica il nodo spento. In figura 3.5 si riportano i risultati delle simulazioni nei casi 1, 1vel.

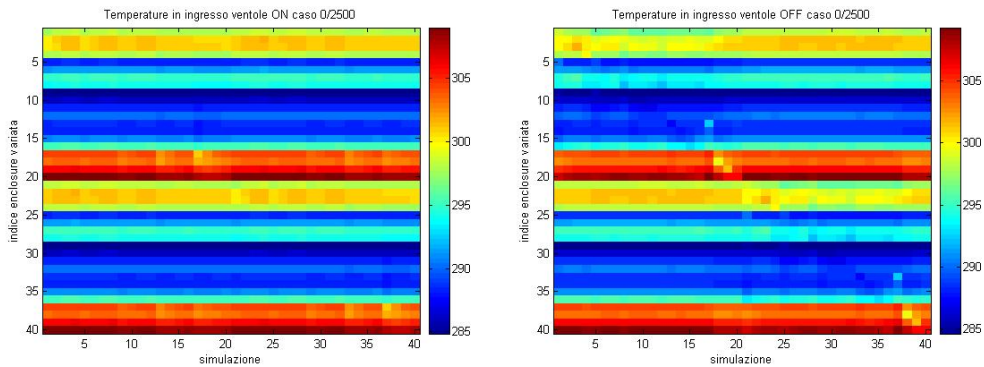


(a) Temperatura (K) in ingresso caso 1vel (b) Temperatura (K) in ingresso caso 1

Figura 3.5: Casi con  $P_v=500 W$

Si evince che mettere i nodi in stato di spegnimento completo comporta un aumento del range di temperatura in ingresso di circa 0.5 K per i casi a bassa potenza, mentre nel caso di potenza massima il range rimane costante.

**L' aumento di temperatura di ogni nodo dello scenario, nello spegnimento del singolo nodo, è inferiore a 5 K nel caso di carico massimo, minore di 0.6 K nel caso di basso carico.** Per quanto riguarda il comportamento dei singoli nodi, abbiamo analizzato quale fosse il diverso comportamento del flusso



(a) Temperatura (K) in ingresso caso 2vel (b) Temperatura (K) in ingresso caso 2

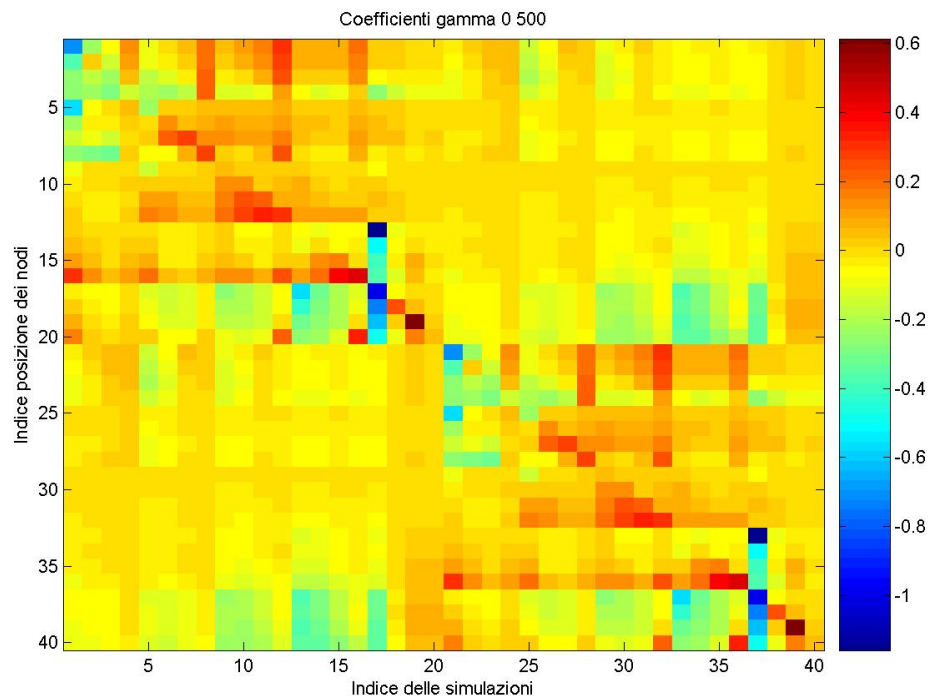
Figura 3.6: *Casi con  $P_v=2500 W$*

d'aria nella stanza al variare del nodo nel caso in cui l' $i$ -esimo nodo cambiasse lo stato da spegnimento parziale a completo. Il risultato è che lo spegnimento delle ventole dei nodi più prossimi al pavimento comporta degli “accumuli” d'aria fredda nelle zone interessate e nei livelli immediatamente sopra. Viene a mancare infatti, la forza delle ventole che contribuiscono, se attive, a spingere l'aria condizionata verso l'alto. Lo spegnimento delle ventole dei nodi più lontani dal CRAC incide maggiormente sulla creazione di zone calde, in quanto la forza aspirante dell'aria calda da parte del CRAC, in questa zona è debole e il blocco delle ventole dei nodi, comporta il ristagno dell'aria fredda.

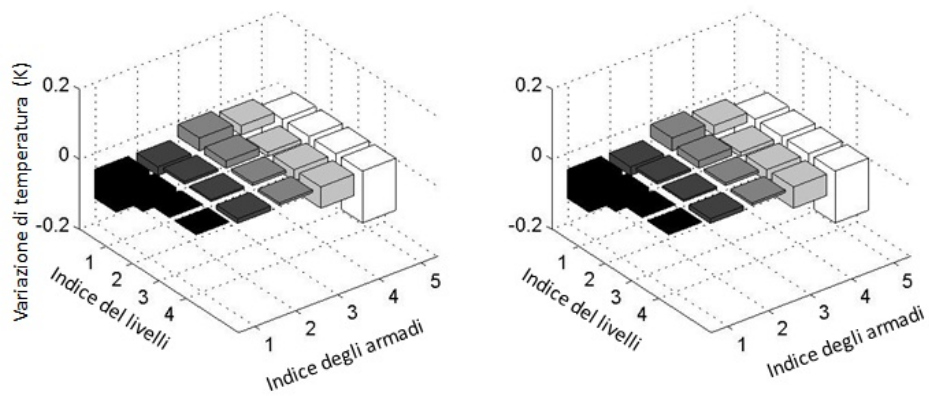
Da ultimo mostriamo quale sia, in media, la variazione di temperatura di ogni nodo al variare dell'indice del nodo completamente spento. In figura 3.7 abbiamo riportato la mappa termica (vedere Appendice A) dello scenario con i nodi accesi a potenza minima  $P = 500 W$ , in 3.8 quella dello scenario coi nodi accesi a potenza massima  $P = 2500 W$ . Si nota come le mappe termiche degli scenari abbiano la stessa “trama”, scalata in dipendenza dalla temperatura media dello scenario stesso. In generale la differenza di temperatura dipende da:

- la temperatura dei nodi che ci sono tra il pavimento e l'indice del nodo che viene spento
- la posizione del nodo che viene spento all'interno della geometria del DC.

Abbiamo anche rappresentato la variazione media di temperatura degli scenari per evidenziare quali siano i nodi che maggiormente risentono del ricircolo: si evidenzia come l'aumento della potenza dei nodi accesi faccia aumentare la temperatura dei livelli più alti degli armadi. Gli indici da 1 a 5 indicano gli armadi di rack, gli indici 1-4 i livelli (dove 1 è il livello più prossimo al pavimento).

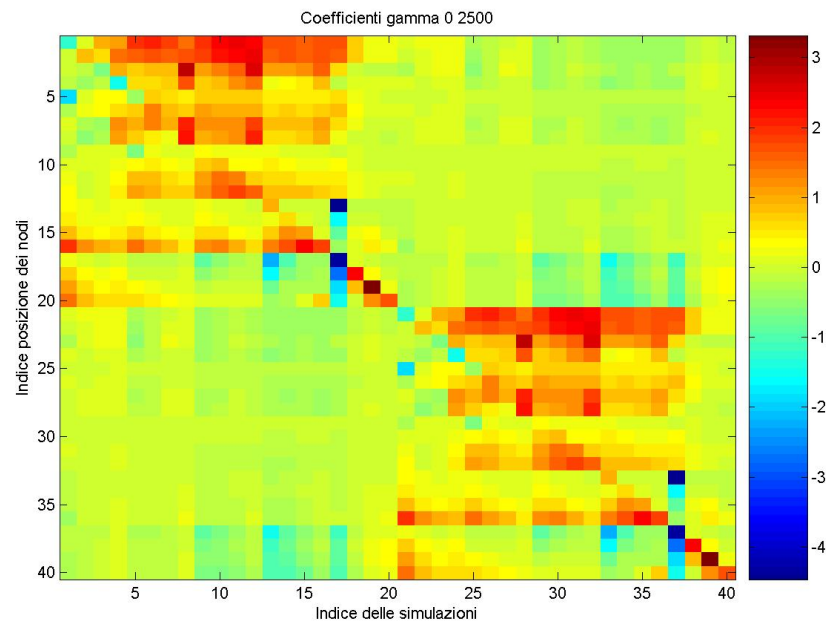


(a) Variazione di temperatura (K) per ogni singola *enclosure* per lo spegnimento delle ventole nello scenario 0/500

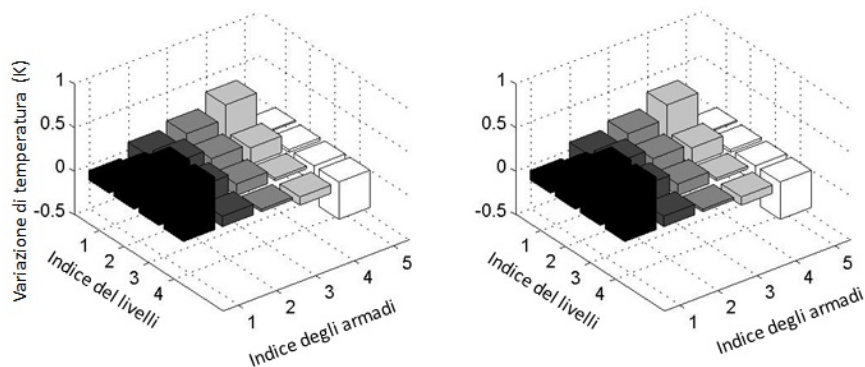


(b) Variazione media espressa in Kelvin di ogni nodo nello spegnimento progressivo delle ventole dei server

Figura 3.7: *Variazione media di temperatura nel caso 500/0*



(a) Mappa termica dello spegnimento delle ventole nello scenario 0/2500: le temperature sono espresse in Kelvin



(b) Variazione (K) media di ogni nodo nello spegnimento progressivo delle ventole dei server

Figura 3.8: *Variazione (K) media di temperatura nel caso 2500/0: le file più lontane dal CRAC risentono grandemente dell'effetto dello spegnimento delle ventole di ogni singolo nodo*



# Capitolo 4

## Proposte di modelli, realizzazioni sperimentali e validazione

### 4.1 Modello lineare

Data una configurazione di potenza del data center all'interno del quale ci sono  $M$ , con  $M < N$ , nodi completamente spenti, abbiamo studiato la possibilità di descrivere l'effetto dello spegnimento delle ventole degli  $M$  nodi come la somma dell'effetto dello spegnimento di ogni singolo nodo eseguito, ciascuno, in uno scenario separato. Abbiamo scelto un modello che permetta una predizione dell'impatto dello spegnimento delle ventole di  $M$  nodi in maniera semplice e piuttosto rapida e abbiamo valutato i suoi limiti di applicabilità.

Abbiamo definito:

$$\delta_i = T_{in,on}^i - T_{in,off}^i \quad (4.1)$$

come la variazione di temperatura in ingresso all' $i$ -esimo nodo quando il nodo passa da spegnimento parziale a completo, e

$$\delta_M^i = T_{in,on}^M - T_{in,off}^M \quad (4.2)$$

la differenza di temperatura in ingresso al nodo  $i$  quando subisce l'effetto dello spegnimento delle ventole, e quindi lo spegnimento parziale diventa completo, di

$M$  nodi. Non abbiamo introdotto nessun vincolo sulla priorità dell'ordine di spegnimento dei nodi: la sequenza dei nodi spenti  $\chi$  è semi casuale e la sua cardinalità  $M$  varia. Semi casuale, in questo contesto, indica che abbiamo reso casuale l'indice del nodo spento ma abbiamo vincolato l'indice dei nodi spenti prima ad una sola fila di rack e poi ad entrambe.  $\chi$  è descritto come un vettore disordinato di elementi  $\chi = \{\alpha, \gamma, \theta, \dots, \omega\}$ . A partire dalla variazione di temperatura in ingresso (oppure in uscita) di ogni nodo a seguito dello spegnimento completo dell' $i$ -esimo nodo, ottenuta tramite le simulazioni fluidodinamiche,

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta\alpha_1 = T_{in,on,1}^\alpha - T_{in,off,1}^\alpha \\ \delta\gamma_1 = T_{in,on,1}^\gamma - T_{in,off,1}^\gamma \\ \delta\theta_1 = T_{in,on,1}^\theta - T_{in,off,1}^\theta \\ \dots \\ \delta\omega_1 = T_{in,on,1}^\omega - T_{in,off,1}^\omega \end{array} \right.$$

abbiamo calcolato l'effetto globale degli spegnimenti di più nodi come somma degli effetti dei singoli spegnimenti:

$$\hat{\delta}_{\chi_M} = \beta_1 \cdot \delta\alpha_1 + \beta_2 \cdot \delta\gamma_1 + \dots + \beta_M \cdot \delta\omega_1$$

#### 4.1.1 Le realizzazioni sperimentali

Per analizzare la sovrapposizione degli effetti abbiamo eseguito numerose simulazioni fluidodinamiche, tramite l'applicativo *Fluent*, che ci permettessero di conoscere il valore delle temperature in ingresso e in uscita ad ogni nodo dello scenario, a seguito dello spegnimento completo di  $N$  nodi, nello stesso intervallo di tempo. I parametri utilizzati per descrivere gli scenari sono:

- la potenza dei nodi accesi: la potenza consumata dai nodi accesi può essere  $P = 500$  W oppure  $P = 2500$  W. In questo tipo di analisi abbiamo voluto valutare gli scenari di potenza minimi e massima, nel modello successivo invece considereremo scenari di potenza più realistici e più comuni, nell'utilizzo dei

nodi nei data center: infatti considereremo gli scenari  $P = 500$  W,  $P = 1000$  W ;

- il numero di nodi spenti nello stesso momento: questo parametro potrà assumere valore pari a 2, 4, 8. Non abbiamo introdotto un numero di nodi completamente spenti troppo elevato rispetto alla totalità dei nodi presenti nel caso di studio (40), in quanto non lo abbiamo considerato utile a livello pratico.
- la loro *posizione all'interno della geometria della sala*: nel caso in cui i nodi spenti appartengano tutti alla stessa fila di rack lo scenario è stato definito *singolo, S*, indicato con la lettera S; se i nodi spenti appartengono ad entrambe le file di rack lo scenario è stato definito *doppio, D* 3.3.

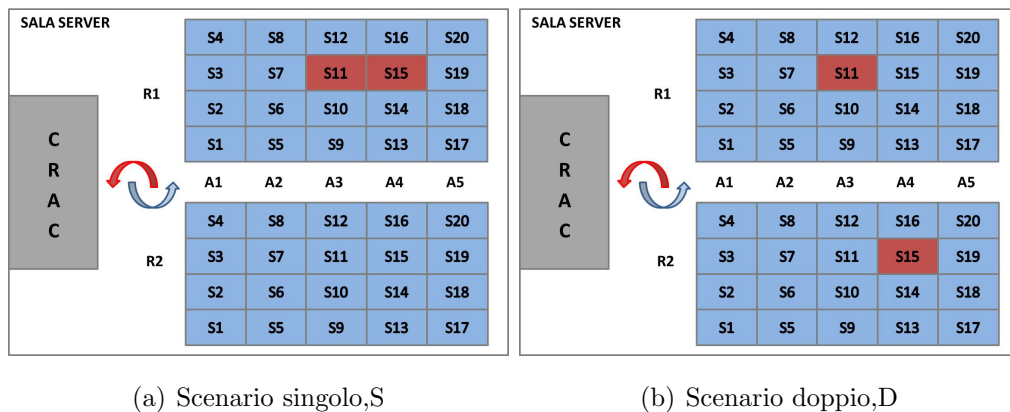


Figura 4.1: *Rappresentazione delle due tipologie di scenari*



Figura 4.2: *Legenda*

Gli scenari descritti sono riassunti nelle tabelle 4.1, e 4.3 inserite a fine capitolo. In ogni scenario abbiamo eseguito la simulazione 5 volte cambiando la posizione dei nodi spenti in maniera variabile: in questo modo abbiamo analizzato quali

siano le zone della sala maggiormente predicibili con un modello lineare e quali invece rappresentino maggiori criticità.

### 4.1.2 L'obiettivo

Dopo aver descritto nel capitolo precedente come abbiamo ricavato le variazioni di temperatura nello spegnimento dei singoli nodi e degli  $M$  nodi contemporaneamente (nel paragrafo precedente), abbiamo verificato il *principio di sovrapposizione degli effetti*, valutando quale fosse l'errore esistente tra la variazione della distribuzione di temperatura ottenuta variando nello stesso scenario  $N$  nodi e la variazione stimata come la somma degli effetti delle variazioni dei singoli nodi (quando tutti gli  $N-1$  nodi sono attivi).

Prima di procedere con la trattazione, vogliamo mostrare quali siano i valori degli effetti dello spegnimento degli  $M$  nodi che vogliamo stimare.

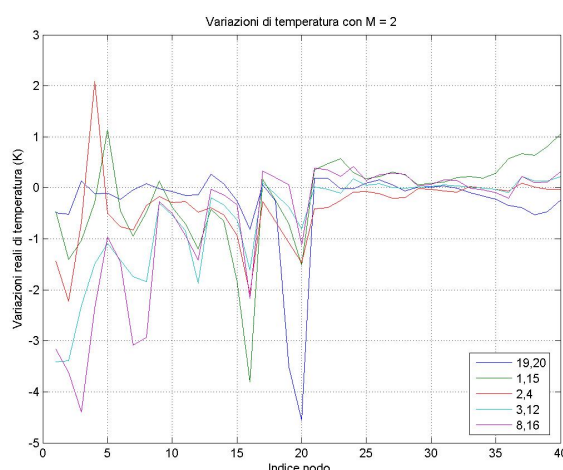


Figura 4.3: *Range di variazione di temperatura (K) nello scenario con i nodi accesi a  $P=2500$  W e 2 nodi completamente spenti*

Dalle figure 4.3, 4.4 e 4.5 si evince infatti come le variazioni di temperatura nei casi riportati ad esempio, in cui i nodi che sono accesi assorbono fino a  $P = 2500$  W, quindi con potenza massima, siano massime negli armadi posti ai lati delle file (R1A1, R1A5, R2A1, R2A5). Le file interne, invece, mantengono variazioni più

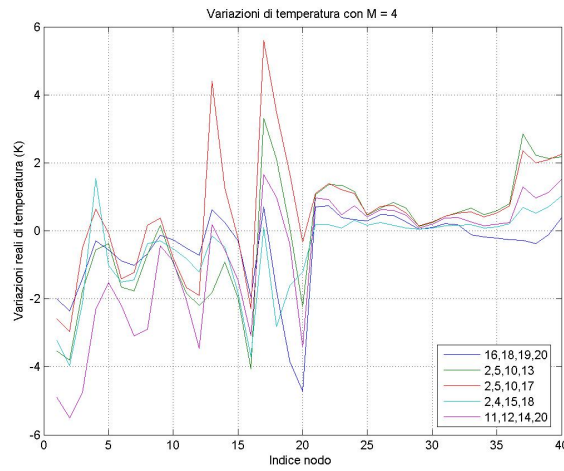


Figura 4.4: *Range di variazione di temperatura (K) nello scenario con i nodi accesi a  $P=2500$  W e 4 nodi completamente spenti*

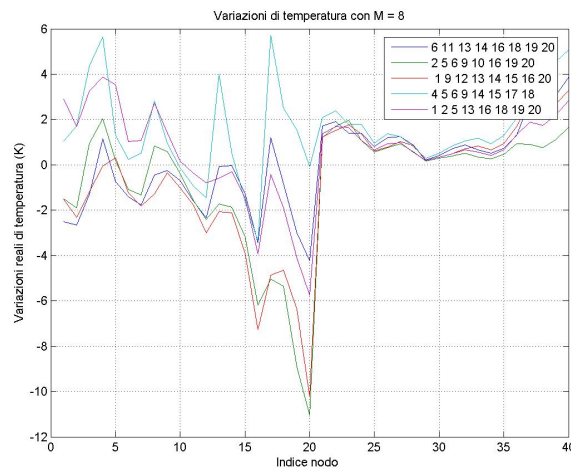


Figura 4.5: *Range di variazione di temperatura (K) nello scenario con i nodi accesi a  $P=2500$  W e 8 nodi completamente spenti*

contenute. Abbiamo giustificato questo comportamento con il fatto che gli armadi più esterni subiscono l'influenza di una maggiore portata d'aria, mentre quelle più interne sono più confinate e allo stesso tempo risultano più controllate.

### 4.1.3 Analisi degli errori

A partire dai valori di variazione di temperatura data dallo spegnimento dei singoli nodi collocati all'interno degli armadi (le cui posizioni utilizzate nelle simulazioni sono riportate nelle tabelle a fine capitolo), abbiamo espresso la variazione di ogni singolo nodo  $j$ -esimo come la differenza tra la temperatura sulla faccia d'ingresso del nodo quando le ventole di raffreddamento del  $i$ -esimo nodo spento erano accese e quando le ventole invece erano spente:

$$\delta_j = T_{in,on}^j - T_{in,off}^j \quad (4.3)$$

Dopodiché abbiamo considerato lo stesso parametro rilevato su ogni nodo dopo aver variato lo stato delle ventole (ventole accese  $\rightarrow$  ventole spente) degli  $N$  nodi da simulare. A questo punto eravamo in grado di analizzare quale fosse l'errore esistente tra la somma degli effetti delle singole variazioni di ciascuno dei nodi e l'effetto fornito dalla variazione contemporanea dei nodi:

$$\delta_M^j = T_{in,on}^M - T_{in,off}^M, \quad (4.4)$$

cioè :

$$err_M^j = (T_{in,on}^M - T_{in,off}^M) - \left( \sum_{i=1}^M T_{in,on}^i - T_{in,off}^i \right) \quad (4.5)$$

Si ottiene che :

- nel caso con  $i$  nodi accesi a 500 W e  $N=8$  nodi spenti, il valore massimo dell'errore di stima è pari a 2 K e corrisponde alla fila di armadi più lontana dal condizionatore. Un'altra zona affetta da errore, ma con un errore assolutamente contenuto è l'armadio più prossimo al condizionatore. Qui l'errore di stima massimo è pari ad 1 K.
- nel caso coi nodi accesi impostati a 2500 W, l'errore massimo è pari a 5 K nella configurazione D, mentre nella configurazione S l'errore è di circa 15 K. Questo significa che l'errore è circa pari al discostamento massimo dei valori. Quindi non è accettabile.

Poiché l'obiettivo del lavoro di tesi è una stima semplice, accurata e stabile, abbiamo considerato un modello più complesso che ci permetta di spingerci oltre i limiti del principio di sovrapposizione degli effetti: questo nuovo modello che vogliamo proporre considera l'effetto del ricircolo dell'aria all'interno della sala. Infatti il modello che abbiamo studiato deriva dalla predizione tramite la matrice di *cross interference*, già largamente descritta nel capitolo secondo.

## 4.2 Gli scenari

In questo paragrafo abbiamo voluto riportare nel dettaglio gli indici delle posizioni dei nodi spenti negli scenari di simulazione considerati, cioè con  $P = 500$  W 4.1 e  $P = 2500$  W 4.3. Per successiva comodità abbiamo riportato anche gli indici dei nodi spenti negli scenari con nodi accesi a  $P = 1000$  W 4.2 che utilizzeremo nel capitolo seguente.

Gli indici si riferiscono al configurazione di spegnimento su una *singola* fila, e il loro indice é  $S$ , se gli indici delle posizioni sono comprese tra 1 – 20, si riferiscono invece alla configurazione di spegnimento su *doppia* fila,  $D$ , se gli indici delle posizioni variano tra 1 – 40. La numerazione progressiva degli indici parte dalla fila  $R1$ , dall'armadio più vicino al condizionatore, dal livello del pavimento fino a quello più alto, proseguendo poi nella fila  $R2$ , sempre con lo stesso percorso.

Simulazioni		
500	2 S	(19, 20) (7, 17) (3, 13) (8, 16) (1, 4)
500	4 S	(16, 18, 19, 20) (5, 6, 11, 16) (3, 6, 10, 20) (1, 2, 6, 9) (1, 2, 9, 20)
500	8 S	(6, 11, 13, 14, 16, 18, 19, 20) (1, 3, 5, 9, 11, 12, 13, 16) (5, 7, 9, 13, 15, 17, 18, 19) (1, 3, 4, 10, 11, 12, 16, 18) (2, 6, 8, 11, 12, 15, 17, 20)

Simulazioni		
500	2 D	(7, 20) (13, 16) (9, 18) (3, 22) (8, 34)
500	4 D	(19, 20, 38, 39) (2, 16, 31, 37) (6, 12, 28, 36) (1, 16, 26, 29) (10, 17, 24, 26)
500	8 D	(16, 18, 19, 20, 26, 31, 33, 38) (4, 12, 13, 20, 29, 30, 33, 39) (3, 5, 17, 20, 23, 25, 26, 28) (5, 6, 11, 17, 21, 25, 33, 36) (1, 2, 11, 14, 24, 26, 35, 37)

Tabella 4.1: *Indice delle posizioni dei nodi spenti con potenza dei nodi accesi  $P=500$*   
 $W$

Simulazioni		
1000	2 S	(19, 20) (6, 9) (9, 18) (3, 9) (9, 10)
1000	4 S	(2, 2, 18, 20) (3, 6, 8, 13) (9, 11, 16, 20) (2, 6, 9, 17) (5, 7, 10, 20)
1000	8 S	(6, 11, 13, 14, 16, 18, 19, 20) (1, 5, 6, 10, 12, 13, 15, 17) (1, 4, 5, 7, 14, 15, 17, 20) (2, 3, 4, 6, 7, 9, 11, 15) (2, 5, 8, 11, 13, 14, 16, 19)

Simulazioni		
14 1000	2 D	(19, 40) (14, 29) (8, 26) (18, 35) (8, 33)
1000	4 D	(19, 20, 38, 39) (7, 10, 24, 35) (1, 13, 30, 32) (11, 15, 32, 33) (10, 18, 22, 26)
1000	8 D	(16, 18, 19, 20, 26, 31, 33, 38) (3, 7, 10, 13, 21, 30, 35, 39) (2, 5, 14, 20, 24, 25, 33, 40) (1, 3, 5, 19, 22, 25, 37, 38) (9, 14, 16, 17, 23, 26, 30, 33)

Tabella 4.2: *Indice delle posizioni dei nodi spenti con potenza dei nodi accesi  $P=1000$*   
 $W$



Simulazioni		
2500	2 S	(19, 20)
		(1, 15)
		(2, 4)
		(3, 12)
		(8, 16)
2500	4 S	(16, 18, 19, 20)
		(2, 5, 10, 13)
		(2, 5, 10, 17)
		(2, 4, 15, 18)
		(11, 12, 14, 20)
2500	8 S	(6, 11, 13, 14, 16, 18, 19, 20)
		(2, 5, 6, 9, 10, 16, 19, 20)
		(1, 9, 12, 13, 14, 15, 16, 20)
		(4, 5, 6, 9, 14, 15, 17, 18)
		(1, 2, 5, 13, 16, 18, 19, 20)

Simulazioni		
2500	2 D	(2, 20)
		(3, 22)
		(18, 31)
		(13, 31)
		(8, 32)
2500	4 D	(19, 20, 38, 39)
		(3, 13, 24, 40)
		(1, 18, 30, 39)
		(1, 19, 23, 28)
		(10, 14, 25, 32)
2500	8 D	(16, 8, 19, 20, 26, 31, 33, 38)
		(8, 9, 11, 15, 21, 27, 30, 39)
		(8, 9, 14, 19, 21, 37, 38, 40)
		(2, 3, 5, 11, 9, 25, 32, 34, 38)
		(9, 11, 13, 19, 28, 32, 34, 39)

Tabella 4.3: *Indice delle posizioni dei nodi spenti con potenza dei nodi accesi*  
 $P=2500 W$

# Capitolo 5

## Una nuova matrice di *cross interference*

A seguito della poca stabilità fornita dal modello basato sul principio della sovrapposizione degli effetti, abbiamo studiato un nuovo modello che permetta di stimare la distribuzione di temperatura di un data center, in seguito allo spegnimento di  $M$  nodi. Il modello fonda le sue radici nello studio del ricircolo d'aria presente nei data center a seguito della variazione di carico e di assorbimento di potenza nodi. Questo approccio è descritto in [5] e [11].

### 5.1 La matrice di cross interference

Per il calcolo della matrice di *cross interference*  $\mathbf{A}$  ci sono diversi approcci utilizzabili e riteniamo utile riportarli per completezza.

1. Calcolo di  $\mathbf{A}$  da  $\mathbf{T}_{out}$ ,  $\mathbf{T}_{sup}$  e  $\mathbf{P}$ :

$$\text{Dato: } \mathbf{T}_{sup} = \vec{\mathbf{T}}_{sup}, \vec{\mathbf{T}}_{sup}, \dots, \vec{\mathbf{T}}_{sup}$$

$$\mathbf{K} \cdot (\mathbf{T}_{out} - \mathbf{T}_{sup}) = \mathbf{A}' \cdot \mathbf{K} \cdot (\mathbf{T}_{out} - \mathbf{T}_{sup}) + \mathbf{P}$$

$$\mathbf{A}' \cdot \mathbf{K} \cdot (\mathbf{T}_{out} - \mathbf{T}_{sup}) = \mathbf{K} \cdot (\mathbf{T}_{out} - \mathbf{T}_{sup}) - \mathbf{P}$$

$$[\mathbf{K} \cdot (\mathbf{T}_{out} - \mathbf{T}_{sup})]' \cdot \mathbf{A} = \mathbf{K} \cdot [(\mathbf{T}_{out} - \mathbf{T}_{sup}) - \mathbf{P}]' \quad (5.1)$$

2. Calcolo di  $\mathbf{A}$  da  $\mathbf{T}_{out}$ ,  $\mathbf{T}_{out}^{ref}$ ,  $\mathbf{P}$  e  $\mathbf{P}_{ref}$ :

$$\mathbf{K} \cdot (\mathbf{T}_{out} - \mathbf{T}_{out}^{ref}) = \mathbf{A}' \cdot \mathbf{K} \cdot (\mathbf{T}_{out} - \mathbf{T}_{out}^{ref}) + \mathbf{P} - \mathbf{P}_{ref}$$

$$\mathbf{A}' \cdot \mathbf{K} \cdot (\mathbf{T}_{out} - \mathbf{T}_{out}^{ref}) = \mathbf{K} \cdot (\mathbf{T}_{out} - \mathbf{T}_{out}^{ref}) - \mathbf{P} + \mathbf{P}_{ref}$$

$$[\mathbf{K} \cdot (\mathbf{T}_{out} - \mathbf{T}_{sup})]' \cdot \mathbf{A} = \mathbf{K} \cdot [(\mathbf{T}_{out} - \mathbf{T}_{sup}) - \mathbf{P} + \mathbf{P}_{ref}]' \quad (5.2)$$

3. Calcolo di  $\mathbf{A}$  da  $\mathbf{T}_{out}$ ,  $\mathbf{T}_{in}$  e  $\mathbf{T}_{sup}$  (versione indipendente da  $\mathbf{K}$ ):

$$\mathbf{K} \cdot (\mathbf{T}_{out} - \mathbf{T}_{sup}) = \mathbf{A}' \cdot \mathbf{K} \cdot (\mathbf{T}_{out} - \mathbf{T}_{sup}) + \mathbf{P} \quad (5.3)$$

Dovendo valere il bilancio termico si può scrivere:

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{T}_{out} = \mathbf{K} \cdot \mathbf{T}_{in} + \mathbf{P} \Rightarrow +\mathbf{P} = \mathbf{K} \cdot (\mathbf{T}_{out} - \mathbf{T}_{in}) \quad (5.4)$$

con  $\mathbf{K} \cdot \mathbf{T}_{out} = \mathbf{Q}_{out}$  e  $\mathbf{K} \cdot \mathbf{T}_{in} = \mathbf{Q}_{in}$

Sostituendo  $\mathbf{P}$  nell'equazione 5.3 si ha:

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{T}_{out} - \mathbf{K} \cdot \mathbf{T}_{sup} = \mathbf{A}' \cdot \mathbf{K}$$

Semplificando e raccogliendo il possibile si ha:

$$\mathbf{K} \cdot (\mathbf{T}_{in} - \mathbf{T}_{sup}) = \mathbf{A}' \cdot \mathbf{K} \cdot (\mathbf{T}_{out} - \mathbf{T}_{sup})$$

$$[\mathbf{K} \cdot (\mathbf{T}_{out} - \mathbf{T}_{sup})]' \cdot \mathbf{A} = \mathbf{K} \cdot [(\mathbf{T}_{in} - \mathbf{T}_{sup})]' \quad (5.5)$$

4. Calcolo di  $\mathbf{A}$  da  $\mathbf{T}_{in}$ ,  $\mathbf{T}_{sup}$  e  $\mathbf{P}$ :

$$\mathbf{K} \cdot (\mathbf{T}_{out} - \mathbf{T}_{sup}) = \mathbf{A}' \cdot \mathbf{K} \cdot (\mathbf{T}_{out} - \mathbf{T}_{sup}) + \mathbf{P}$$

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{T}_{out} - \mathbf{K} \cdot \mathbf{T}_{sup} = \mathbf{A}' \cdot \mathbf{K} \cdot \mathbf{T}_{out} - \mathbf{A}' \cdot \mathbf{K} \cdot \mathbf{T}_{sup} + \mathbf{P} \quad (5.6)$$

Dovendo anche in questo caso valere il bilancio termico 5.1 si ottiene, sostituendo  $\mathbf{K} \cdot \mathbf{T}_{out}$  alla 5.6:

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{T}_{in} + \mathbf{P} - \mathbf{K} \cdot \mathbf{T}_{sup} = \mathbf{A}' \cdot \mathbf{K} \cdot \mathbf{T}_{in} + \mathbf{A}' \cdot \mathbf{P} - \mathbf{A}' \cdot \mathbf{K} \cdot \mathbf{T}_{sup} + \mathbf{P}$$

Semplificando e raccogliendo il possibile si ha:

$$\mathbf{A}' \cdot [\mathbf{K} \cdot (\mathbf{T}_{in} - \mathbf{T}_{sup}) + \mathbf{P}] = \mathbf{K} \cdot (\mathbf{T}_{in} - \mathbf{T}_{sup})$$

$$[\mathbf{K} \cdot (\mathbf{T}_{in} - \mathbf{T}_{sup}) + \mathbf{P}]' \cdot \mathbf{A} = [\mathbf{K} \cdot (\mathbf{T}_{in} - \mathbf{T}_{sup})]' \quad (5.7)$$

5. Calcolo di  $\mathbf{A}$  da  $\mathbf{T}_{in}$ ,  $\mathbf{T}_{in}^{ref}$ ,  $\mathbf{P}$  e  $\mathbf{P}_{ref}$ :

$$\mathbf{K} \cdot (\mathbf{T}_{out} - \mathbf{T}_{out}^{ref}) = \mathbf{A}' \cdot \mathbf{K} \cdot (\mathbf{T}_{out} - \mathbf{T}_{out}^{ref}) + \mathbf{P} - \mathbf{P}_{ref}$$

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{T}_{out} - \mathbf{K} \cdot \mathbf{T}_{out}^{ref} = \mathbf{A}' \cdot \mathbf{K} \cdot \mathbf{T}_{out} - \mathbf{A}' \cdot \mathbf{K} \cdot \mathbf{T}_{out}^{ref} + \mathbf{P} - \mathbf{P}_{ref} \quad (5.8)$$

Dovendo valere il bilancio termico 5.4 anche per il caso di riferimento si ottiene sostituendo  $\mathbf{K} \cdot \mathbf{T}_{out}$  e  $\mathbf{K} \cdot \mathbf{T}_{out}^{ref}$  alla 5.8:

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{T}_{in} + \mathbf{P} - \mathbf{K} \cdot \mathbf{T}_{in}^{ref} - \mathbf{P}_{ref} = \mathbf{A}' \cdot \mathbf{K} \cdot \mathbf{T}_{in} + \mathbf{A}' \cdot \mathbf{P} - \mathbf{A}' \cdot \mathbf{K} \cdot \mathbf{T}_{in}^{ref} - \mathbf{A}' \cdot \mathbf{P}_{ref} + \mathbf{P} - \mathbf{P}_{ref}$$

Semplificando e raccogliendo il possibile si ha:

$$\mathbf{A}' \cdot [\mathbf{K} \cdot (\mathbf{T}_{in} - \mathbf{T}_{in}^{ref}) + \mathbf{P} - \mathbf{P}^{ref}] = \mathbf{K} \cdot (\mathbf{T}_{in} - \mathbf{T}_{in}^{ref})$$

$$[\mathbf{K} \cdot (\mathbf{T}_{in} - \mathbf{T}_{in}^{ref}) + \mathbf{P} - \mathbf{P}^{ref}]' \cdot \mathbf{A} = [\mathbf{K} \cdot (\mathbf{T}_{in} - \mathbf{T}_{in}^{ref})]' \quad (5.9)$$

La nostra scelta è ricaduta sulla 5.7. Per calcolare  $\mathbf{A}$  abbiamo utilizzato i valori di  $T_{in}$ ,  $T_{sup}$  e  $P$ , dove  $T_{in}$  è la temperatura dell'aria in ingresso al nodo,  $T_{sup}$  è la temperatura dell'aria fornita dal condizionatore, da noi impostata a 283 K e mantenuta fissa,  $P$  è la potenza assorbita dai nodi. Questi valori sono affetti da errore, in quanto sono stati da noi impostati nel modello; quelli ottenuti dalle simulazioni, invece, potrebbero esserlo. Infatti ogni simulazione di *Fluent* termina quando si verifica uno dei seguenti eventi:

- sono soddisfatti i parametri di convergenza
- è stato raggiunto il numero massimo di simulazioni impostato.

Un primo livello di analisi è stato introdotto analizzando la convergenza delle simulazioni. Queste, infatti, forniscono il valore delle temperature calcolate ogni 10 simulazioni, salvandole in file creati ad hoc. Questo permette di analizzare la differenza, alle diverse cifre decimali fra 2 gruppi di iterazioni successive. Dai risultati abbiamo ottenuto che la maggior parte delle simulazioni ha raggiunto il limite massimo di iterazioni (impostato da noi a 2000). In questo caso nelle ultime 350 iterazioni la differenza tra due successive è inferiore a 0.00001. Abbiamo verificato che al 45% del numero massimo delle iterazioni stabilite (tra 800 e 900 iterazioni), la differenza tra due successive è sufficiente all'accuratezza richiesta dalle nostre elaborazioni.

A questo punto è stato possibile calcolare  $\mathbf{A}$ .

Siamo partiti da uno scenario misto. Si tratta di un set di 700 simulazioni che rappresentano la stessa geometria del data center fin qui considerato ma con una diversa configurazione di potenza. Infatti ogni simulazione, tutti i nodi erano accesi e ciascuno aveva una potenza scelta a caso tra i valori  $P = 500$  W,  $P = 2500$  W,  $P = 3500$  W.

Di conseguenza abbiamo ottenuto, tramite *Fluent*, i valori delle temperature in ingresso e in uscita. Questo meccanismo ci ha permesso di calcolare  $A$  tramite la stima ai minimi quadrati, poiché eravamo in presenza di un sistema sovradimensionato.

## 5.2 La cross interference modificata

A partire dalla matrice  $A$  appena ricavata abbiamo descritto lo spegnimento delle ventole di raffreddamento all'interno degli  $M$  nodi posti a  $P = 0$  W come *l'assenza di ricircolo attivo fornito dal nodo in questione*. Questo viene descritto, nello scenario in esame, imponendo che il nodo completamente spento non contribuisca attivamente al ricircolo del flusso d'aria, ma rimanga solo la sua componente di ricircolo passivo.

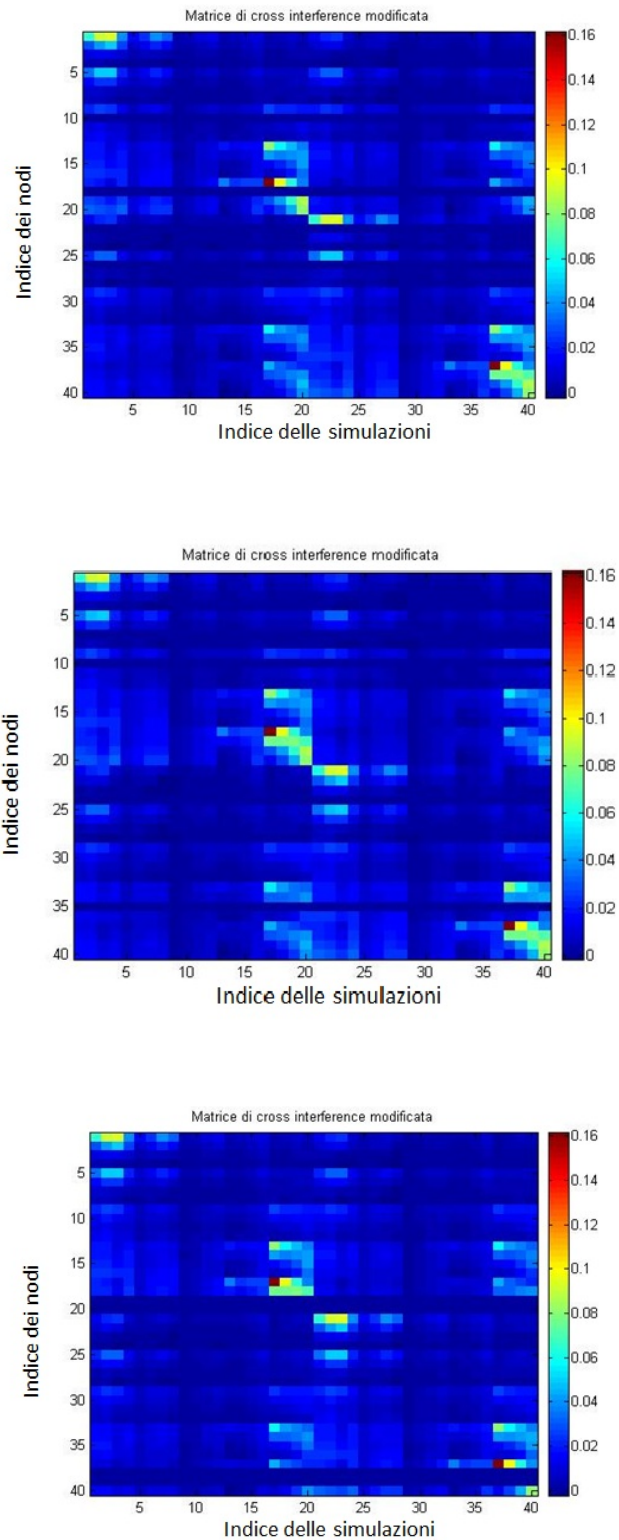
In figura 5.1 si evidenzia come il contributo delle righe corrispondenti ai nodi completamente spenti sia identicamente nullo. Si osserva anche come i restanti valori della matrice siano identici.

Partendo dalla 5.7, imponendo che  $P_i = 0$  W quando il nodo non assorbe potenza e le ventole sono spente, utilizzando la 3.12 si ottiene:

$$T_{in} = (A'_{mod} \cdot T_{out}) + (I - A'_{mod}) \cdot T_{sup} \quad (5.10)$$

dove  $A_{mod}$  è la matrice di *cross interference* costruita in modo tale che *il contributo di temperatura in uscita dagli  $M$  nodi spenti sia annullato e il contributo di temperatura del flusso d'aria fornito dal condizionatore in quei nodi diventi massimo*. Abbiamo quindi calcolato l'effetto che il blocco delle ventole dei nodi completamente spenti produce su ogni altro nodo dello scenario come la media delle variazioni effettuate su ogni nodo in cui le ventole sono state bloccate. In questo modo il peso assegnato ad ogni nodo è lo stesso, a prescindere dalla sua posizione all'interno della geometria del data center.

Il nodo che riceve l'aria calda dal ricircolo viene definito *vittima*, mentre è detto *donatore* quello che fornisce aria calda [11]. Si definisce *Exit Coefficient* del nodo  $i$  la frazione di potenza termica che dall'uscita del nodo procede verso il

Figura 5.1: Matrici  $A_{mod}$  per diverse sequenze di nodi spenti

condizionatore senza creare ricircolo, mentre viene detto *Recirculation Coefficient* al nodo  $j$  la quantità di potenza termica ottenuta all'ingresso del nodo, dall'aria calda che ricircola, invece che dall'aria fredda del condizionatore.

I coefficienti sono stati così calcolati:

$$EC_i = 1 - \sum_{j=1}^N \alpha_{i,j} \quad (5.11)$$

$$RC_i = \sum_{j=1}^N \alpha_{i,j} \quad (5.12)$$

Abbiamo riportato come esempio i coefficienti di ricircolo in tabella 5.7, posta a fine capitolo: i nodi con valore  $RC = 0$  sono quelli che sono stati completamente spenti. In tabella 5.8, anch'essa posta a fine capitolo, sono riportati invece i coefficienti d'uscita, dello stesso scenario. Un valore basso di EC indica che il nodo è fonte importante di ricircolo, siccome gran parte del flusso d'aria che esce non va al condizionatore; un valore alto di RC invece, indica che il nodo risente molto dell'effetto del ricircolo.

Analizzando questi valori si ricava come i nodi :

- con minore EC sono il nodo 18 e il nodo 38 (simmetrici)
- con maggiore RC è il nodo 17

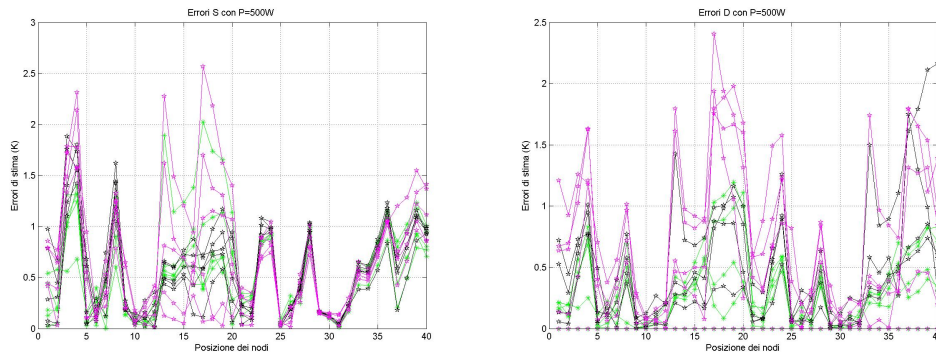
Questa analisi è interessante per capire quali siano le file di armadi e i livelli ad essi interni che incidono maggiormente sul ricircolo quando uno o più nodi vengono spenti.

## 5.3 Analisi dei risultati

Dai risultati ottenuti abbiamo ricavato come vari l'errore della stima e quali siano le collocazioni fisiche dei nodi, all'interno della geometria, con un tasso d'errore minore.

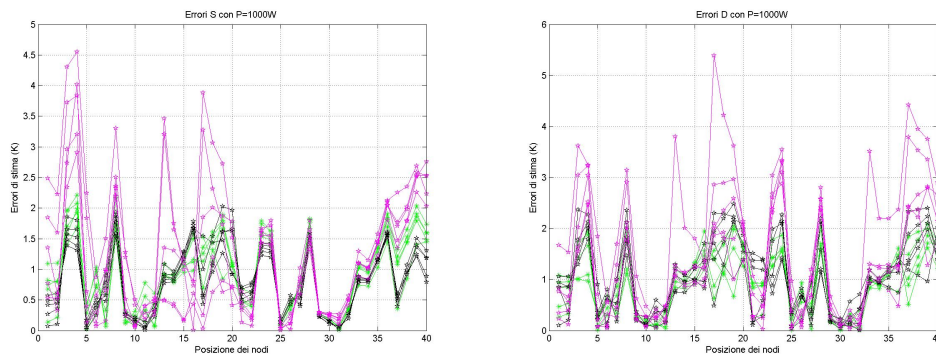
Si ricava come :





(a) Errore (espresso in Kelvin) nella configurazione di spegnimento su fila singola. (b) Errore (espresso in Kelvin) nella configurazione di spegnimento su fila doppia.

Figura 5.2: *Errore (espresso in Kelvin) di stima nel caso di blocco delle ventole nello scenario con nodi accesi a  $P = 500 W$ . In verde l'errore dovuto allo spegnimento di 2 nodi, in nero 4 nodi in magenta 8 nodi*



(a) Errore (espresso in Kelvin) nella configurazione di spegnimento su fila singola. (b) Errore (espresso in Kelvin) nella configurazione di spegnimento su fila doppia.

Figura 5.3: *Errore di stima (espresso in Kelvin) nel caso di blocco delle ventole nello scenario con nodi accesi a  $P = 1000 W$ . In verde l'errore dovuto allo spegnimento di 2 nodi, in nero 4 nodi in magenta 8 nodi*

- nello scenario coi nodi accesi a  $P=500 W$  5.2: l'errore massimo nel caso D minore di 2.5 K, mentre nel caso S l'errore è minore 2.7 K. Gli armadi interni della fila R1 (A2-A4) risultano meglio stimati. Il caso peggiore di

stima corrisponde al nodo R1A1S1. L'errore nello scenario S ha lo stesso andamento del caso D, ma è leggermente più alte (si intende sempre in valore assoluto).

- nello scenario coi nodi accesi a  $P=1000$  W 5.3: nel caso di spegnimento su un solo lato (caso S), l'errore massimo è pari a 4.5 K. L'armadio con errore maggiore è R1A1 nel caso di spegnimento di 8 nodi. Nel caso di spegnimento di 2 e di 4 nodi, l'errore massimo è minore di 2.3 K. Nel caso invece di spegnimento di nodi su entrambe le file (caso D), l'errore massimo è 5.5 K, mentre l'errore massimo è in media minore di 3.5 K nel caso di spegnimento di 8 nodi. Nel caso di spegnimento di 2 e 4 nodi l'errore massimo è sempre minore di 2 K.

A questo punto è utile fare alcune considerazioni.

Gli armadi R1A1 e R1A5 hanno, nella maggior parte dei casi, un errore che, rispetto agli altri armadi, nei quali l'errore medio è 2-3 K, è maggiore di 2 K.

Qui di seguito le tabelle 5.2, 5.1, 5.4, 5.3, 5.5 e 5.6 riportano i valori massimo e medio di ogni scenario.

Err(K) 2 D	P=500 W	P=1000 W
Max	1.1939	2.0901
Avg(K)	0.2393	0.9284

Tabella 5.1: *Errore massimo della stima nel caso di assorbimento di potenza del nodo fino al 40% e spegnimento di 2 nodi in scenario doppio*

Err(K) 2 S	P=500 W	P=1000 W
Max	2.0240	2.2124
Avg(K)	0.5475	0.9457

Tabella 5.2: *Errore massimo della stima nel caso di assorbimento di potenza del nodo fino al 40% e spegnimento di 2 nodi in scenario singolo*

Err 4 D	P=500 W	P=1000 W
Max(K)	2.1640	2.4826
Avg(K)	0.3555	1.0258

Tabella 5.3: *Errore massimo della stima nel caso di assorbimento di potenza del nodo fino al 40% e spegnimento di 4 nodi in scenario doppio*

Err 4 S	P=500 W	P=1000 W
Max(K)	1.8827	2.0301
Avg (K)	0.5574	0.8247

Tabella 5.4: *Errore massimo della stima nel caso di assorbimento di potenza del nodo fino al 40% e spegnimento di 4 nodi in scenario singolo*

Err 8 S	P=500 W	P=1000 W
Max(K)	2.5662	4.5550
Avg(K)	0.6338	1.2015

Tabella 5.5: *Errore massimo della stima nel caso di assorbimento di potenza del nodo fino al 40% e spegnimento di 8 nodi in scenario doppio*

Err 8 D	P=500 W	P=1000 W
Max(K)	2.5121	5.3924
Avg(K)	0.5365	1.3953

Tabella 5.6: *Errore massimo della stima nel caso di assorbimento di potenza del nodo fino al 40% e spegnimento di 8 nodi in scenario singolo*

1	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61
2	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
3	0.092477	0.092477	0.092477	0	0.092477
4	0.0003769	0.0003769	0.0003769	0.0003769	0.0003769
5	0.47032	0.47032	0.47032	0.47032	0.47032
6	0.2364	0.2364	0.2364	0.2364	0.2364
7	0	0.078382	0.078382	0.078382	0.078382
8	0.033596	0.033596	0.033596	0.033596	0
9	0.48371	0.48371	0	0.48371	0.48371
10	0.35265	0.35265	0.35265	0.35265	0.35265
11	0.20794	0.20794	0.20794	0.20794	0.20794
12	0.17432	0.17432	0.17432	0.17432	0.17432
13	0.74554	0	0.74554	0.74554	0.74554
14	0.62437	0.62437	0.62437	0.62437	0.62437
15	0.49508	0.49508	0.49508	0.49508	0.49508
16	0.41514	0	0.41514	0.41514	0.41514
17	0.87324	0.87324	0.87324	0.87324	0.87324
18	0.80704	0.80704	0	0.80704	0.80704
19	0.70705	0.70705	0.70705	0.70705	0.70705
20	0	0.64887	0.64887	0.64887	0.64887
21	0.61123	0.61123	0.61123	0.61123	0.61123
22	0.31601	0.31601	0.31601	0	0.31601
23	0.087579	0.087579	0.087579	0.087579	0.087579
24	-0.010758	-0.010758	-0.010758	-0.010758	-0.010758
25	0.46648	0.46648	0.46648	0.46648	0.46648
26	0.25397	0.25397	0.25397	0.25397	0.25397
27	0.093619	0.093619	0.093619	0.093619	0.093619
28	0.030009	0.030009	0.030009	0.030009	0.030009
29	0.49535	0.49535	0.49535	0.49535	0.49535
30	0.34035	0.34035	0.34035	0.34035	0.34035
31	0.22288	0.22288	0.22288	0.22288	0.22288
32	0.16154	0.16154	0.16154	0.16154	0.16154
33	0.75795	0.75795	0.75795	0.75795	0.75795
34	0.64147	0.64147	0.64147	0.64147	0
35	0.49336	0.49336	0.49336	0.49336	0.49336
36	0.40668	0.40668	0.40668	0.40668	0.40668
37	0.88242	0.88242	0.88242	0.88242	0.88242
38	0.80565	0.80565	0.80565	0.80565	0.80565
39	0.71835	0.71835	0.71835	0.71835	0.71835
40	0.64727	0.64727	0.64727	0.64727	0.64727

Tabella 5.7: Valori dei *coefficienti di ricircolo* nello scenario con i nodi accesi a  $P=500$  W, 2 nodi spenti completamente e configurazione con spegnimento su doppia fila

1	0.38584	0.38584	0.38584	0.38584	0.38584
2	0.66712	0.66712	0.66712	0.66712	0.66712
3	0.90752	0.90752	0.90752	1	0.90752
4	0.99962	0.99962	0.99962	0.99962	0.99962
5	0.52968	0.52968	0.52968	0.52968	0.52968
6	0.7636	0.7636	0.7636	0.7636	0.7636
7	1	0.92162	0.92162	0.92162	0.92162
8	0.9664	0.9664	0.9664	0.9664	1
9	0.51629	0.51629	1	0.51629	0.51629
10	0.64735	0.64735	0.64735	0.64735	0.64735
12	0.79206	0.79206	0.79206	0.79206	0.79206
13	0.82568	0.82568	0.82568	0.82568	0.82568
14	0.25446	1	0.25446	0.25446	0.25446
15	0.37563	0.37563	0.37563	0.37563	0.37563
16	0.50492	0.50492	0.50492	0.50492	0.50492
17	0.58486	1	0.58486	0.58486	0.58486
18	0.12676	0.12676	0.12676	0.12676	0.12676
19	0.19296	0.19296	1	0.19296	0.19296
20	0.29295	0.29295	0.29295	0.29295	0.29295
21	1	0.35113	0.35113	0.35113	0.35113
22	0.38877	0.38877	0.38877	0.38877	0.38877
23	0.68399	0.68399	0.68399	1	0.68399
24	0.91242	0.91242	0.91242	0.91242	0.91242
25	1.0108	1.0108	1.0108	1.0108	1.0108
26	0.53352	0.53352	0.53352	0.53352	0.53352
27	0.74603	0.74603	0.74603	0.74603	0.74603
28	0.90638	0.90638	0.90638	0.90638	0.90638
29	0.96999	0.96999	0.96999	0.96999	0.96999
30	0.50465	0.50465	0.50465	0.50465	0.50465
31	0.65965	0.65965	0.65965	0.65965	0.65965
32	0.77712	0.77712	0.77712	0.77712	0.77712
33	0.83846	0.83846	0.83846	0.83846	0.83846
34	0.24205	0.24205	0.24205	0.24205	0.24205
35	0.35853	0.35853	0.35853	0.35853	1
36	0.50664	0.50664	0.50664	0.50664	0.50664
37	0.59332	0.59332	0.59332	0.59332	0.59332
38	0.11758	0.11758	0.11758	0.11758	0.11758
39	0.19435	0.19435	0.19435	0.19435	0.19435
40	0.28165	0.28165	0.28165	0.28165	0.28165

Tabella 5.8: Valori dei *coefficienti di uscita* nello scenario con i nodi accesi a  $P=500$  W, 2 nodi spenti completamente e configurazione con spegnimento su doppia fila

# Capitolo 6

## Conclusioni e sviluppi futuri

### 6.1 Conclusioni

Abbiamo pensato questo lavoro di tesi al fine di sviluppare un modello che predicesse quale sia l'effetto dello spegnimento delle ventole di raffreddamento di alcuni server sulla distribuzione di temperatura della sala. I flussi d'aria presenti in un data center, infatti, si compongono di una quota parte fornita dall'impianto di condizionamento e una quota parte che esce dai nodi e fluiscono verso l'ingresso del condizionatore: quest'ultima parte poi viene aspirata dal condizionatore che la raffredda e la rimette in circolo tramite delle griglie poste sul pavimento. In realtà esiste anche un'altra quota parte che è composta dall'aria che esce dai nodi e rientra sia nel nodo stesso, sia negli altri nodi. Questo fenomeno è stato rappresentato tramite una matrice, detta di *cross interference*, che descrive numericamente, sulla base della distribuzione di potenza dello scenario e sulla base della temperatura dell'aria fornita dal condizionatore, quale sia il fattore di ricircolo di ogni nodo in uscita e in ingresso. Partendo da queste condizioni abbiamo cercato un modello che fosse semplice, accurato e stabile per descrivere quale fosse l'effetto dello spegnimento di  $N$  nodi su tutti i nodi presenti nel data center. Questo modello avrebbe permesso di valutare se ci siano zone del data center, a partire da una specifica geometria, che risentano maggiormente dell'assenza di attività delle ventole. Questo infatti potrebbe creare accumuli d'aria calda, *hot spots*, che ar-

rivati a certe temperature possono arrecare danni alle apparecchiature e rendono difficile il ritorno ad una temperatura omogenea in tutta la sala.

Abbiamo quindi valutato diversi metodi e abbiamo voluto soffermarci inizialmente sul modello lineare: l'obiettivo era analizzare quale fosse il limite dettato dal *principio della sovrapposizione degli effetti*. Considerando quindi una sequenza sparsa e casuale di  $N$  nodi, abbiamo simulato quale fosse l'impatto su tutto il data center dello spegnimento di un solo nodo per volta scelta dalla sequenza. Salvati i risultati, abbiamo spento contemporaneamente  $N$  nodi e abbiamo simulato quale fosse l'impatto sulla distribuzione delle temperature. A questo punto abbiamo calcolato l'errore esistente tra le due misure e abbiamo rilevato che l'errore, quando i nodi rimasti accesi assorbono  $P = 500$  W oppure  $P = 2500$  W, l'errore è piccolo se il numero di nodi spenti è minore di 4. Quando i nodi spenti sono 8 l'errore cresce di un ordine di grandezza. Questo significa che il metodo non è stabile.

Abbiamo poi implementato un metodo che si basa sull'utilizzo della matrice di *cross interference* e nei nodi spenti impone che il ricircolo attivo, cioè quello per cui il nodo fornisce aria di ricircolo, sia nullo: in queste condizioni il nodo spento subisce l'aria calda ma non contribuisce a forzarla verso la faccia d'uscita del nodo stesso. In questo caso l'errore massimo è più elevato, in media è circa 3 K, ma è più stabile: questo significa che nel caso di aumento di nodi il massimo dell'errore rimane sempre sotto i 5.5 K, che peraltro raggiunge sempre in zone confinate e identificate del data center. Questo ci ha anche permesso di identificare quali fossero le zone maggiormente stimabili della geometria da noi utilizzata.

I risultati ottenuti ci permettono, quindi di stimare l'effetto dello spegnimento delle ventole fino a 8 nodi, contenenti ciascuno fino a 16 blade server, con un errore medio massimo di 3 K e alcuni picchi identificati in alcune zone, di 5 K.

Questo risultato permette di considerare quali siano le zone del data center per le quali si può stimare la distribuzione di temperatura con errore minore: questo permette una prima analisi di quali siano i nodi più adatti ad ospitare tipi di carico.

## 6.2 Sviluppi futuri

Finisco ora, prima della consegna della tesi di laurea uno stage formative presso eni ICT. Durante la mia esperienza ho partecipato ad un progetto europeo, FIT4Green <sup>1</sup>, che si è posto l’obbiettivo di sviluppare un framework di integrazione per la gestione efficace di data center tramite il consolidamento dei server. Questo framework ha la necessità di essere agnostico rispetto alla tipologia di data center cui viene applicato: sia esso tradizionale, HPC oppure cloud. Il framework analizza i carichi in essere ai server che ospitano ambienti virtuali: se rileva l’opportunità di consolidare, avvisa il sistema che effettua ulteriori verifiche. Qualora si verificasse l’opportunità di risparmiare energia il consolidamento avviene.

Il mio lavoro di tesi potrebbe essere un ulteriore miglioramento al sistema di consolidamento: infatti permetterebbe di analizzare quali siano i nodi che risentono maggiormente dell’aumento o della diminuzione di potenza. Infatti una valutazione “geografica” all’interno del data center porterebbe sicuramente un maggior *saving* energetico ed economico.

---

<sup>1</sup>[www.fit4green.eu](http://www.fit4green.eu)



# Appendice A

La mappa termica 6.1 rappresenta i valori di temperatura di ogni nodo all'interno dello scenario scelto.

All'interno delle colonne si trovano i valori delle temperatura inerenti ad ogni simulazione, mentre in ogni riga si trovano i valori di temperatura di ogni nodo durante tutte le simulazioni.

Riporto una mappa termica che rappresenta la variazione presente su ogni faccia in ingresso di ogni nodo dello scenario quando il nodo programmato per lo spegnimento passa da avere le ventole accese ad avere le ventole spente. Questo passaggio è stato descritto all'interno della tesi come "spegnimento completo" (in contrapposizione a "spegnimento parziale" in cui il nodo con potenza assorbita nulla manteneva comunque le ventole di raffreddamento accese).

In questo caso in ascissa si trovano gli indici delle simulazioni, in ordinata gli indici dei nodi all'interno della geometria. Gli indici delle simulazioni sono pari ai 40 nodi presenti nel data center: infatti ad ogni simulazione è stato spento un nodo e tutti gli altri 39 sono stati mantenuti accesi. Nella simulazione seguente abbiamo riacceso il nodo spento e abbiamo spento quello successivo e mantenuto tutti gli altri accesi. L'ordine di spegnimento è stato progressivo a partire dalla fila R1 3.3 , armadio A1 livello S1: abbiamo proseguito nell'armadio stesso fino al livello S4, per poi procedere con l'armadio A2, fino alla fine della fila. Abbiamo poi ripetuto lo stesso sulla fila R2. In ogni simulazione abbiamo salvato la temperatura di ogni nodo, nello stesso ordine utilizzato nelle simulazioni, quindi:

- le righe 1-4 contengono i valori dell'armadio R1A1
- le righe 5-8 contengono i valori dell'armadio R1A2

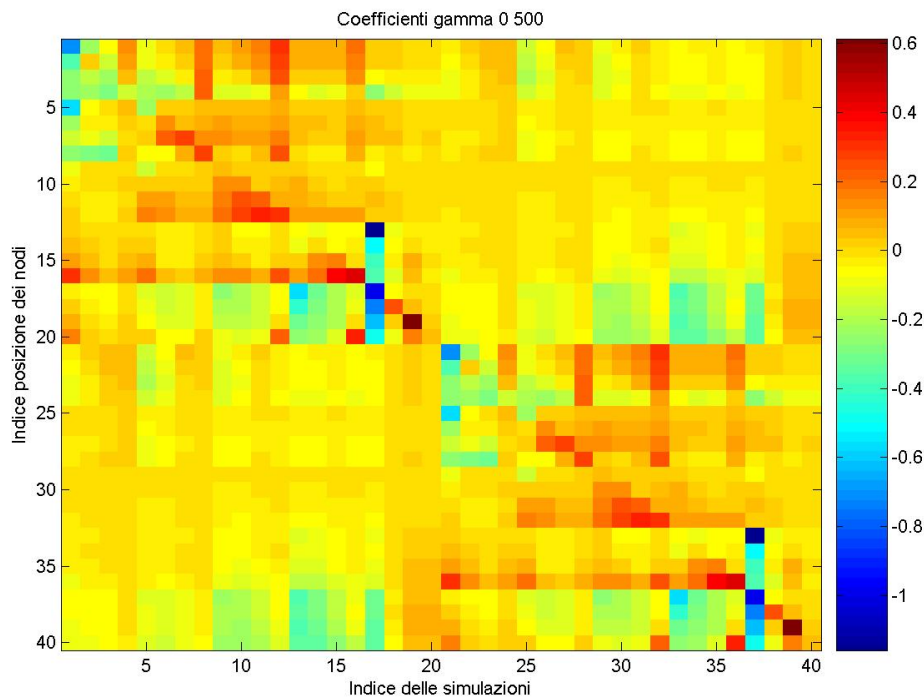


Figura 6.1: *Variazione di temperatura (espressa in Kelvin) di ogni nodo allo spegnimento progressivo dei nodi. Gamma è la differenza tra il valore della temperatura in ingresso ai nodi quando sono spenti con le ventole accese e quando sono spenti con le ventole spente*

- le righe 9-12 contengono i valori dell'armadio R1A3
- le righe 13-16 contengono i valori dell'armadio R1A4
- le righe 17-20 contengono i valori dell'armadio R1A5

da qui iniziano gli armadi della fila R2, descritti con lo stesso criterio.

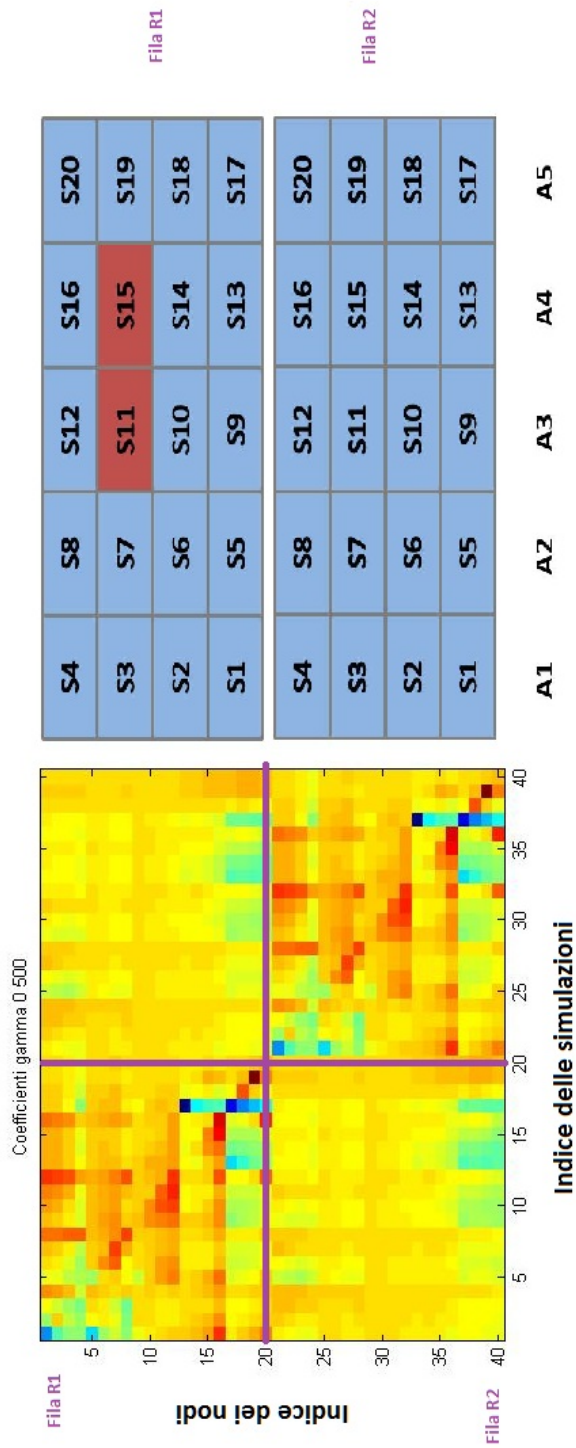


Figura 6.2: Strumento di lettura delle mappe termiche

# Elenco delle figure

1.1	<i>Consumo energetico dei 20 maggiori consumatori al mondo . . . . .</i>	5
1.2	<i>Emissioni di CO<sub>2</sub> da consumo energetico dei 20 maggiori consumatori al mondo . . . . .</i>	6
1.3	<i>Emissioni di CO<sub>2</sub> da consumo energetico e consumo energetico in Italia . . . . .</i>	7
1.4	<i>Emissioni di CO<sub>2</sub> stimate per l'anno 2012 in Italia . . . . .</i>	8
2.1	<i>Descrizione logica funzionamento di RAILS. Permette di far lavorare le PSU nella loro zona di maggior efficienza . . . . .</i>	15
2.2	<i>Descrizione logica funzionamento di PowerNap: quando un server ha elaborato tutto il carico assegnatogli, il suo stato attivo, passa in nap . . . . .</i>	16
2.3	<i>Mappa termica, dall'esterno di un rack server . . . . .</i>	18
2.4	<i>Mappa termica dell'interno di un server x335 Server Box . . . . .</i>	18
2.5	<i>Caso particolare dello studio:data una particolare configurazione di CRAC e data un particolare posizione dei rack nella sala, si nota il cambiamento del ricircolo intorno al rack che segue le fluttuazioni della temperatura in ingresso . . . . .</i>	20
3.1	<i>Descrizione logica del coefficiente di cross interference tra nodi distribuiti . . . . .</i>	23
3.2	<i>La disposizione degli armadi di rack . . . . .</i>	26
3.3	<i>Descrizione logica del DC visto dall'alto, dove si evidenziano i corridoi caldo e freddo . . . . .</i>	27

3.4	<i>Descrizione logica del DC con boundary condition periodic . . . . .</i>	29
3.5	<i>Casi con <math>P_v=500 W</math> . . . . .</i>	33
3.6	<i>Casi con <math>P_v=2500 W</math> . . . . .</i>	34
3.7	<i>Variazione media di temperatura nel caso 500/0 . . . . .</i>	36
3.8	<i>Variazione (K) media di temperatura nel caso 2500/0: le file più lontane dal CRAC risentono grandemente dell'effetto dello spegnimento delle ventole di ogni singolo nodo . . . . .</i>	37
4.1	<i>Rappresentazione delle due tipologie di scenari . . . . .</i>	40
4.2	<i>Legenda . . . . .</i>	40
4.3	<i>Range di variazione di temperatura (K) nello scenario con i nodi accesi a <math>P=2500 W</math> e 2 nodi completamente spenti . . . . .</i>	41
4.4	<i>Range di variazione di temperatura (K) nello scenario con i nodi accesi a <math>P=2500 W</math> e 4 nodi completamente spenti . . . . .</i>	42
4.5	<i>Range di variazione di temperatura (K) nello scenario con i nodi accesi a <math>P=2500 W</math> e 8 nodi completamente spenti . . . . .</i>	42
5.1	<i>Matrici Amod per diverse sequenze di nodi spenti . . . . .</i>	52
5.2	<i>Errore (espresso in Kelvin) di stima nel caso di blocco delle ventole nello scenario con nodi accesi a <math>P = 500 W</math>. In verde l'errore dovuto allo spegnimento di 2 nodi, in nero 4 nodi in magenta 8 nodi . . .</i>	54
5.3	<i>Errore di stima (espresso in Kelvin) nel caso di blocco delle ventole nello scenario con nodi accesi a <math>P = 1000 W</math>. In verde l'errore dovuto allo spegnimento di 2 nodi, in nero 4 nodi in magenta 8 nodi</i>	54
6.1	<i>Variazione di temperatura (espressa in Kelvin) di ogni nodo allo spegnimento progressivo dei nodi. Gamma è la differenza tra il valore della temperatura in ingresso ai nodi quando sono spenti con le ventole accese e quando sono spenti con le ventole spente . . . . .</i>	63
6.2	<i>Strumento di lettura delle mappe termiche . . . . .</i>	64

# Elenco delle tabelle

3.1	Casi simulati per la valutazione dell'impatto dello spegnimento delle ventole nei casi di potenza massima e minima . . . . .	32
4.1	<i>Indice delle posizioni dei nodi spenti con potenza dei nodi accesi <math>P=500\text{ W}</math></i> . . . . .	45
4.2	<i>Indice delle posizioni dei nodi spenti con potenza dei nodi accesi <math>P=1000\text{ W}</math></i> . . . . .	45
4.3	<i>Indice delle posizioni dei nodi spenti con potenza dei nodi accesi <math>P=2500\text{ W}</math></i> . . . . .	46
5.1	<i>Errore massimo della stima nel caso di assorbimento di potenza del nodo fino al 40% e spegnimento di 2 nodi in scenario doppio</i> . . .	55
5.2	<i>Errore massimo della stima nel caso di assorbimento di potenza del nodo fino al 40% e spegnimento di 2 nodi in scenario singolo</i> . . .	55
5.3	<i>Errore massimo della stima nel caso di assorbimento di potenza del nodo fino al 40% e spegnimento di 4 nodi in scenario doppio</i> . . .	56
5.4	<i>Errore massimo della stima nel caso di assorbimento di potenza del nodo fino al 40% e spegnimento di 4 nodi in scenario singolo</i> . . .	56
5.5	<i>Errore massimo della stima nel caso di assorbimento di potenza del nodo fino al 40% e spegnimento di 8 nodi in scenario doppio</i> . . . .	56
5.6	<i>Errore massimo della stima nel caso di assorbimento di potenza del nodo fino al 40% e spegnimento di 8 nodi in scenario singolo</i> . . .	56

---

5.7	Valori dei <b>coefficienti di ricircolo</b> nello scenario con i nodi accesi a $P=500$ W, 2 nodi spenti completamente e configurazione con spegnimento su doppia fila . . . . .	57
5.8	Valori dei <b>coefficienti di uscita</b> nello scenario con i nodi accesi a $P=500$ W, 2 nodi spenti completamente e configurazione con spegnimento su doppia fila . . . . .	58

# Ringraziamenti

I ringraziamenti di questo mio lavoro di tesi vanno a tutti coloro che anche solo una volta hanno creduto in me e nelle mie capacità...

... il Prof. Cremonesi e Andrea che mi hanno seguito in questo percorso...

... uno in particolare, va a mamma e papà, per avermi permesso di essere qui oggi ma soprattutto per esser stati il mio punto fermo...

... a Marghe e Paolo, i miei fratelli, secondo i quali sono un 'mostro di studio'...

... a Mirko, Davide, Raffaele, Andrea, Rossella, Teddy ... per il loro aiuto molto importante..e Fede, che si occupa e preoccupa per me..

... a chi mi ha sempre sostenuta in eni...chi mi ha fatto crescere come Maria e come futura Dott.ssa Ing.Maria, a Gianfranco Braus, Marco Sciancalepore, Domenico Sannelli e Fabio Magnaghi...

... a chi mi ha sopportato e ha condiviso con me questi lunghi anni...in università e nelle tante esperienze di "coinquilinato", molte sbocciate poi in amicizia...

...a coloro che non sono citati qui ma sanno di essere importanti per me.

Un ultimo grazie va a mia nonna che dirà: "Brava Meri!" ...



# Bibliografia

- [1] “Enerdata,” *Available [Online] at: [www.enerdata.net/enerdatauk/press-and-publication/publications/g-20-2010-strongly-energy-demand-increase.php](http://www.enerdata.net/enerdatauk/press-and-publication/publications/g-20-2010-strongly-energy-demand-increase.php)*.
- [2] “Parliamentary office of science and technology, ICT and CO2 emissions,” *Available [Online] at: [www.enerdata.net/enerdatauk/press-and-publication/publications/g-20-2010-strongly-energy-demand-increase.php](http://www.enerdata.net/enerdatauk/press-and-publication/publications/g-20-2010-strongly-energy-demand-increase.php)*.
- [3] “Global action plan handbook,” *Available [Online] at: [www.globalactionplan.org.uk/sites/gap/files/Green](http://www.globalactionplan.org.uk/sites/gap/files/Green)*.
- [4] *Metrics to characterise data center IT equipment energy use*, 2006.
- [5] Q. Tang, T. Mukherjee, S. Gupta, and P. Cayton, “Sensor-based fast thermal evaluation model for energy efficient high-performance data centers,” in *Proceedings of the IEEE Conference*.
- [6] D. Meisner, B. T. Gold, and T. F. Wenisch, “Powernap: eliminating server idle power,”
- [7] A. Sansottera and P. Cremonesi, “Cooling-aware workload placement with performance constraints,” *Performance Evaluation*, vol. 68, no. 11, 2011.
- [8] J. Choi, Y. Kim, and A. Sivasubramaniam, “Modelling and managing thermal profiles of rack-mounted servers with thermostat,” tech. rep.
- [9] S. Rivoire, P. Ranganathan, and C. Kozyrakis, “Effect of transient boundary conditions and detailed thermal modeling of data center rooms,” *In HotPower. USENIX Association*, 2008.

- 
- [10] J. Rhee, “The role of superposition techniques in thermal management,”
  - [11] Q. Tang, S. Gupta, and G. Varsamopoulos, “Thermal aware task scheduling for data centers through minimizing heat recirculation,” in *Proceedings of the IEEE Conference on Cluster Computing*.
  - [12] E. Pakbaznia and M. Pedram, “Minimizing data center cooling and server power costs,” in *Proceedings of the 14th ACM/IEEE International Symposium on Low power Electronics and Design ISLPED '09*, 2009.