



# POLITECNICO DI TORINO

DIPARTIMENTO DI ENERGIA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica – Innovazione  
nella produzione di energia

---

TESI DI LAUREA

Analisi dei consumi del settore data center e  
valutazione del potenziale di mercato per installazioni  
Fuel Cell di taglia medio-piccola

**Relatori:**

GANDIGLIO MARTA  
SANTARELLI MASSIMO

**Candidato:**  
GURRIERI MARCO

---

ANNO DIDATTICO 2021/2022

## Sommario

I.	ABSTRACT .....	I
II.	Introduzione .....	II
1.	Struttura di un data center .....	1
1.1	Introduzione ai data center.....	1
1.2	I data centers e il web .....	2
1.3	Come funziona un data center .....	3
1.4	Composizione di un data center.....	3
1.4.1	Sistema di Raffreddamento.....	4
1.4.2	Power Delivery .....	5
1.4.3	IT Equipment .....	6
2.	Classificazione dei data centers.....	7
2.1	“TIER” Classification .....	7
2.1.1	Reliability.....	8
2.1.2	Availability .....	8
2.2	Classificazione in base alla taglia .....	11
3.	CONSUMI ENERGETICI NEI DATA CENTERS .....	12
3.1	Indicatori di prestazioni .....	12
3.2	Il PUE .....	13
3.3	Cooling Mode .....	15
3.4	Caso Studio 1 .....	16
3.5	Caso studio 2.....	20
3.5.1	Analisi annuale.....	23
4.	Stato attuale dei sistemi di alimentazione dei Data Centers .....	27
5.	Celle a combustibile nei Data Centers .....	29
5.1	Fuel Cells: Pro e Contro .....	29

5.2	Tipologie di Fuel Cells .....	30
5.3	Architettura del sistema. ....	33
5.4	Capacità di carico delle Fuel Cells. ....	34
5.4.1	Modifiche istantanee del carico .....	34
5.4.2	Modifiche del carico a breve termine .....	35
5.4.3	Modifiche del carico a lungo termine .....	36
6.	Sistemi sperimentali FC-Data Centers .....	36
6.1	Setup sperimentale .....	37
6.2	Rendimento della Fuel Cell .....	37
6.3	Rendimento del sistema FC .....	39
6.4	Efficienza del Data Center .....	43
7.	Analisi economica .....	46
7.1	Data Center in Europa .....	46
7.2	CAPEX E OPEX .....	48
7.3	NPV e PBT .....	49
7.4	Analisi dei flussi di cassa.....	50
7.4.1	Consumi di gas naturale e produzione di energia elettrica .....	51
7.4.2	Analisi a breve termine .....	52
7.4.3	Analisi a lungo termine .....	56
7.5	Variazione dei costi di gas ed energia elettrica .....	59
7.5.1	Gas naturale.....	60
7.5.2	Energia elettrica .....	61
8.	Conclusioni.....	63
9.	Indice e Riferimenti Bibliografici .....	65
9.1	Bibliografia .....	65
9.2	Indice delle Figure .....	67

9.3 Indice delle Tabelle.....68

## I. ABSTRACT

Il seguente lavoro di tesi ha l'obiettivo di analizzare la struttura e i consumi energetici dei Data Centers per valutare la fattibilità fisica ed economica dell'installazione di un sistema SOFC per alimentarli. Lo stato attuale dei sistemi di alimentazione dei Data Centers è molto dipendente dalla rete elettrica, in quanto fonti rinnovabili come l'eolico o il fotovoltaico sono troppo discontinue per poter essere utilizzate in questo settore. Contrariamente le Solid Oxide Fuel Cells o le celle a combustibile, più in generale, costituiscono una valida alternativa poiché sono fonti di energia rinnovabile affidabili e continue, caratteristiche fondamentali nel settore dei Data Centers. L'affidabilità della tecnologia è stata dimostrata tramite uno studio sull'Availability, che nelle SOFC raggiunge livelli maggiori di quelli della rete di distribuzione. Successivamente sono stati analizzati i consumi dei Data Centers ed è stata verificata la capacità delle Fuel Cells di adattarsi anche a variazioni repentine di carico, alle quali i Data Centers possono essere soggetti. Una volta dimostrata la fattibilità fisica dovuta alle caratteristiche di adattabilità e affidabilità delle SOFC, è stata svolta un'analisi dei flussi di cassa, atta a dimostrare l'attuale mancanza di competitività della tecnologia in esame da un punto di vista economico. Tuttavia, sviluppi futuri che mirano a migliorarne l'efficienza e ad abbassarne i costi, possono rendere la tecnologia delle Fuel Cells molto più competitiva di altre fonti energetiche nel settore Data Centers e più in generale nel mondo delle energie rinnovabili.

## **II. Introduzione**

Il presente lavoro di tesi ha lo scopo di effettuare un'analisi energetica ed economica sullo stato dei data centers al giorno d'oggi, analizzare quali possono essere i miglioramenti da un punto di vista delle efficienze, e verificare, infine, il potenziale di mercato per installazioni di Fuel cell di taglia medio-piccola come mezzo di alimentazione per i data center stessi.

Il capitolo 1 è dedicato ad una descrizione fisica dei data center, ovvero alla loro composizione in termini strutture ed equipaggiamenti essenziali per il corretto funzionamento.

Nel capitolo 2 si analizzano i due metodi principali, utilizzati oggi a livello mondiale, per la classificazione dei data centers: si parlerà della "Tier Classification" e della classificazione in base alla taglia.

Il capitolo 3 entra nel dettaglio dei consumi, analizzando due casi studi di data centers effettivamente esistenti e confrontandoli fra loro, grazie anche all'introduzione di indici di efficienza (come il PUE). L'importanza di questo capitolo sta nel darci le basi per approfondire lo studio sui consumi e proseguire con un'analisi economica.

Il capitolo 4 è dedicato alla descrizione dello stato attuale dei Data Centers e in particolare dei sistemi di alimentazione più diffusi al giorno d'oggi, per poi passare al capitolo 5, dove, dopo una breve descrizione dei modelli di Fuel Cells e di come funzionano, sono descritte tutte le caratteristiche che rendono le SOFC adatte all'alimentazione di un Data Center e come cambierebbe il sistema di alimentazione.

Il capitolo 6 analizza i vantaggi che i sistemi di Fuel Cells apportano a un Data Center, in particolare efficienze, sia a livello di sistema che a livello di consumi, emissioni e semplificazioni strutturali.

Il capitolo 7 affronta due analisi economiche, a breve e lungo termine, con particolare attenzione su quest'ultima, in quanto la più interessante. Proprio partendo da quest'analisi a lungo termine, sono state analizzate diverse variabili che possono influenzare il PBT dell'investimento ed eventuali migliorie sia economiche che tecniche che possono essere apportate.

# 1. Struttura di un data center

Un data center è un impianto utilizzato per ospitare sistemi informatici e i componenti associati necessari al suo funzionamento, come la rete ed i sistemi di storage. Comprende un doppio sistema di alimentazione, una rete di comunicazione ridondante, un sistema di controllo ambientale (ad esempio, raffreddamento e climatizzazione) e sistemi di sicurezza.

## 1.1 Introduzione ai data center

I data center hanno origine nelle grandi sale computer, che contenevano i primi sistemi informatici. Data la loro complessità, dovuta soprattutto al grande numero di sistemi ausiliari e attrezzature come ad esempio telai, pavimenti sopraelevati e supporti per cavi, fu necessario costruire stanze apposite per contenerli ed organizzarli. Inoltre, tutti i componenti richiedevano molta energia, nell'operare si surriscaldavano facilmente e dovevano essere continuamente raffreddati attraverso sistemi di raffreddamento, più o meno complessi, che richiedevano ulteriore spazio. Inizialmente non c'era molta organizzazione e ogni sistema era differente dagli altri ma, dopo il 1980 con i computer che cominciarono ad essere più diffusi nel mondo e con la crescita di complessità delle operazioni, le imprese diventarono



Figura 1. Data center di nuova generazione a Marcoussis (Francia)

consapevoli della necessità di organizzare e controllare le risorse IT. Con l'avvento del client-server computing e la disponibilità a basso costo delle attrezzature di rete è stato possibile utilizzare un disegno gerarchico e ordinato che permetteva di inserire i server in un locale specifico all'interno delle aziende. È a questo punto che nasce la definizione vera e proprio di data center.

## ***1.2 I data centers e il web***

Il boom dei data centers è avvenuto con la bolla del dot-com: sempre più imprese per distribuire i loro servizi, ed avere una presenza sul web, avevano bisogno di connettività Internet a grande velocità con una continua disponibilità. Per molte piccole imprese non era possibile sostenere i costi d'installazione di queste attrezzature, quindi si cominciarono a costruire grandi impianti, chiamati Internet Data Centers (IDC), che permettevano a più aziende di utilizzare un'ampia gamma di soluzioni per la distribuzione di servizi e operazioni. Nel corso degli anni, sono state sviluppate nuove tecnologie e pratiche specifiche per la gestione di operazioni su larga scala, che successivamente, sono state largamente adottate a causa della loro praticità in quasi tutti i data center. A partire dal 2007, il design di data centers, la costruzione e il loro funzionamento, sono diventate una disciplina molto conosciuta, ed esistono documenti standard, creati da gruppi di professionisti e organizzazioni, che specificano i requisiti per la progettazione dei data center e le migliori pratiche da utilizzare. Si stanno sviluppando, inoltre, tecniche di progettazione e strumenti eco-sostenibili, per ridurre i consumi e l'inquinamento considerando che in genere i data centers sono molto costosi sia da costruire, ma soprattutto da mantenere, soprattutto per il loro aumento di diffusione e uso negli ultimi anni. Esigenze di business nel mercato di Internet, richiedono sempre di più l'aumento del numero di data centers e di energia ad uso dei server. Più le aziende aumentano la loro offerta di servizi digitali, più la domanda per la potenza di calcolo e di memoria aumenta. Alcuni esempi di servizi digitali in aumento, in questi anni, sono: on-line banking, e-commerce, monitoraggio online delle spedizioni postali e il download e streaming di musica e video.

### ***1.3 Come funziona un data center***

I data centers sono strutture altamente specializzate, organizzate per consentirne la massima efficienza funzionale a dispositivi, sistemi e servizi. Ciò è possibile grazie a sistemi di connettività stabili e ridondanti, ovvero attraverso una configurazione duplicata che garantisce la continuità operativa nel caso di guasti a uno o più sistemi. Questo per garantire sempre e comunque la massima funzionalità. Tutta l'infrastruttura di una data center è incentrata su reti che implementano il protocollo IP e collegano tra loro macchine e applicazioni. Ogni server farm ospita differenti set di router (dispositivi di rete che si occupano di instradare i dati, suddivisi in pacchetti, fra sottoreti diverse). Ospita inoltre switch progettati e configurati per veicolare il traffico dati in modo bidirezionale fra i server e il resto del mondo. All'interno di un data center, oltre ai server, si trovano vari sistemi di archiviazione dei dati (storage), diversi sistemi informatici atti al monitoraggio, al controllo e alla gestione di macchine, applicazioni. Per garantire l'operatività e la piena efficienza, oltre a dei gruppi di continuità (UPS centers) i data centers prevedono impianti di climatizzazione e di controllo ambientale molto particolari, impianti antincendio e sistemi di sicurezza avanzati.

### ***1.4 Composizione di un data center***

In questo paragrafo si descriveranno le parti in cui è composto un data center. In particolare, si parlerà dei componenti principali che permettono il funzionamento del data center e che richiedono un elevato consumo di energia elettrica: i sistemi di raffreddamento, i sistemi di approvvigionamento energetico e le macchine informatiche; senza entrare nel dettaglio delle altre parti esistenti come la struttura fisica, gli uffici e i laboratori per i tecnici e lo staff.

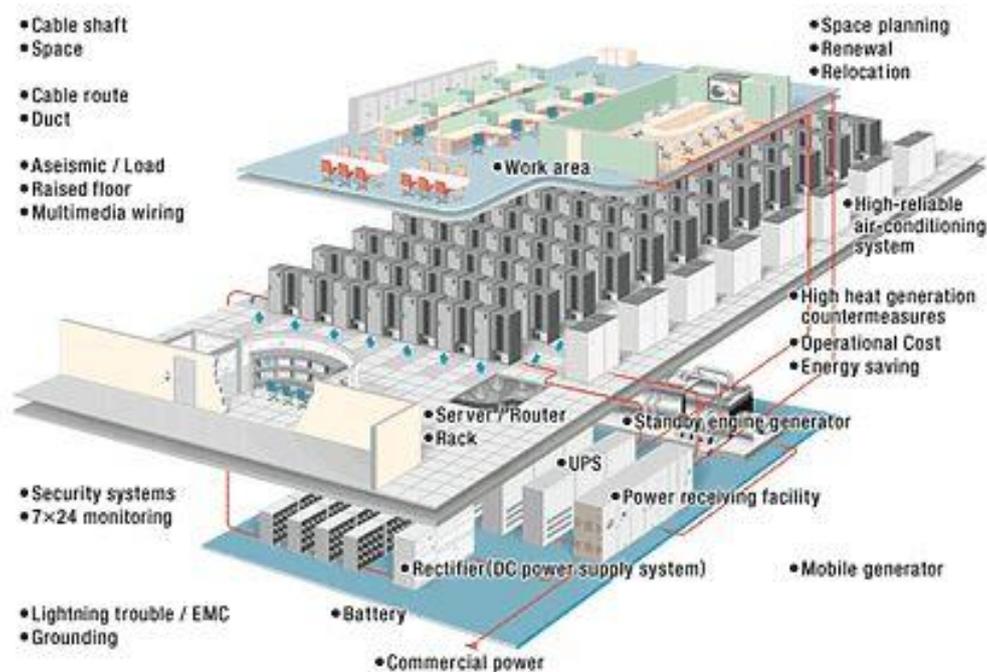


Figura 2 Struttura di un data center

Nella figura 2 sono rappresentati tutti i componenti di un generico data centers e la loro posizione. I più importanti e quelli che verranno descritti successivamente sono schematizzati nella seguente figura 3.

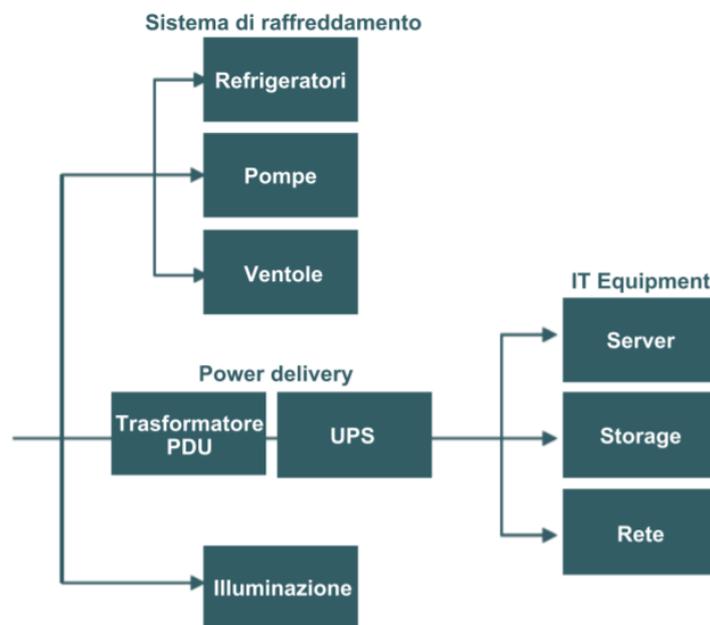


Figura 3. Principali componenti di un data center

### 1.4.1 Sistema di Raffreddamento

L'infrastruttura di raffreddamento occupa una parte significativa di un data center. Il numero di server e macchine presenti all'interno, durante il loro funzionamento, producono

un elevato calore. Per evitare il surriscaldamento e il conseguente danneggiamento dei componenti IT, è necessario raffreddarli continuamente, e tenerli ad una temperatura costante. Per questo scopo si utilizza un sistema di raffreddamento che comprende refrigeratori, pompe e ventole.

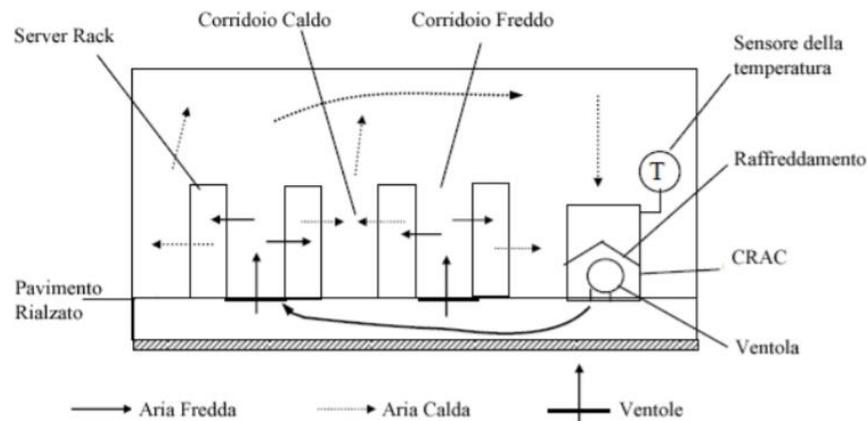


Figura 4. Sistema di raffreddamento

La figura 4 mostra un tipico sistema di raffreddamento, con unità di condizionamento modulari e con un pavimento rialzato che permette la circolazione di aria fredda. La dimensione e la potenza del sistema è dimensionato in base al carico previsto dei server, durante la fase di design del data center. Il flusso dell'aria viene distribuito uniformemente attraverso il CRAC (computer room air conditioning), che controlla la temperatura attraverso un sensore tipicamente settato a 20°C, che misura la temperatura interna. L'aria fredda viene distribuita attraverso il pavimento della stanza con l'utilizzo di ventole e pompe, raggiunge i server raffreddandoli e successivamente l'aria calda, che va in alto, ritorna nel condizionatore per essere nuovamente raffreddata e distribuita nel data center. L'insieme di questi componenti crea un'ambiente ottimale e garantisce longevità ai vari componenti. Allo stesso tempo, però, questo ecosistema ha un costo consistente nell'economia del data center.

#### 1.4.2 Power Delivery

È il sistema di approvvigionamento energetico del data center. Tipicamente l'infrastruttura comprende il collegamento con la rete elettrica, generatori, batterie di backup e l'energia per il sistema di raffreddamento. L'energia viene recuperata dalla rete elettrica esterna. In caso

di mancanza di corrente interviene un generatore all'interno del data center che provvede a fornire l'energia necessaria al sistema. Attraverso questi apparati elettrici si ricaricano delle batterie di backup, che hanno l'utilità di mantenere una potenza costante anche in caso di interruzioni sia dalla rete elettrica che dal generatore interno e per compensare fluttuazioni della rete o temporanee perdite di potenza. L'energia, viene distribuita alle macchine del datacenter attraverso l'UPS (gruppo statico di continuità), non prima di essere opportunamente adattata al voltaggio di funzionamento, dei componenti IT, utilizzando l'unità PDU (power distribution unit). Si può avere anche un doppio collegamento a due differenti PDU per migliorare l'affidabilità del sistema. Il grado di ridondanza nel sistema, di conseguenza, è una considerazione molto importante nell'infrastruttura. Il data center non deve rimanere mai senza energia per questo sono previste varie fonti di approvvigionamento e batterie di riserva, più il sistema è ridondante maggiore sarà la resistenza alle emergenze ma, allo stesso tempo, i costi d'installazione e di manutenzione di tale sistema saranno ancora più elevati.

### *1.4.3 IT Equipment*

IT (Information Technology) è l'area che comprende diverse tecnologie e apparecchiature tra cui ma non limitatamente a queste: hardware, software, sistemi informativi e linguaggi di programmazione. In sintesi, tutto quello che rende i dati, informazioni o conoscenze percepibili in un formato visivo, e che possono essere distribuite attraverso qualsiasi mezzo multimediale. In un data center è la parte principale, che rende possibili le sue operazioni fondamentali, e contiene gli apparati elettronici che sono utilizzati per l'elaborazione dei dati (server), l'immagazzinamento dei dati (storage) e le comunicazioni (network). L'insieme di questi componenti è conosciuto come «information technology equipment». Collettivamente, questi componenti processano, memorizzano e trasmettono informazioni digitali. Richiedono un'ambiente esclusivo, dove vengono posizionati e organizzati in modo ottimale, per ridurre il surriscaldamento e per impedire incidenti alle macchine e allo staff di supporto. Il numero di elementi dell'IT equipment deve essere deciso in fase di progettazione del centro. È molto importante considerare la potenza necessaria in fase di partenza e prevedere quella futura, per lasciare spazio a nuovi aggiornamenti o all'inserimento di nuovi componenti e, allo stesso tempo, per evitare una spesa eccessiva o

inutile. Questa è una delle parti, che incide maggiormente nei costi del data center, sia per l'acquisto sia per la manutenzione; ma hanno anche un costo dal punto di vista dei consumi elettrici compresi quelli derivanti dal sistema di raffreddamento, più è grande la dimensione dell'IT equipment, maggiore sarà la potenza necessaria per raffreddare i componenti.

## **2. Classificazione dei data centers**

Progettare un “Centro dati” non è un procedimento banale: connettività, ambienti ed edifici, operatività e continuità, sistemi di alimentazione e raffreddamento, sicurezza fisica e controllo degli accessi sono tutti aspetti critici di cui si deve tenere conto.

Per poter definire degli standard di riferimento The Uptime Institute (la Global Data Center Authority) ha creato un sistema standard di classificazione dei livelli[1] (grazie al quale si possono oggi classificare i data center) come mezzo per valutare in maniera efficace l'infrastruttura di un data center, soprattutto in termini di sicurezza, affidabilità e disponibilità dei sistemi. Nel 2005, proprio sulla base di questo sistema di valutazione, Telecommunications Industry Association (TIA) ha creato la prima serie di standard (poi evoluta ed aggiornata) oggi riconosciuta a livello internazionale come lo standard TIA-942.

### ***2.1 “TIER” Classification***

Il sistema di classificazione dei data centers (che oggi si basa su quattro livelli detti TIER) fornisce all'industria un metodo coerente e universale per poter confrontare le strutture in base a dei criteri unici come le prestazioni dell'infrastruttura del sito (intesa come ambiente generale del Data Center, non solo come sistema IT) ed il tempo di attività (traducibile, più semplicemente, con il concetto di “livello di servizio garantito”). Ogni “Tier” rappresenta un livello diverso a seconda della configurazione e delle richieste tecniche associate a un data center. Vediamo allora in dettaglio quali sono le differenziazioni tra i vari livelli di classificazione di un data center.

	Generators	UPS system	Mechanical	Maintenance
Tier 1	Optional	N	N	Outage for maintenance
Tier 2	N	N + 1	N + 1	Outage for maintenance
Tier 3	N + 1	N + 1	N + 1	Concurrently maintainable
Tier 4	2N	2N	2N	Fault tolerant

Tabella 1. Requisiti della “Tier” classification

Con “N” viene indicato il numero di generatori, UPS (Gruppi di continuità) necessari a generare il carico. Ad esempio, se il carico è di 500 kW, un UPS da 500 kW sarà “N”. “N+1” indica che ci sono due moduli ups da 500 kW, uno per generare il carico e l’altro in ridondanza. “2N” indica la presenza di due sistemi completi ognuno dei quali è in grado di generare il carico necessario.

Per entrare più nel dettaglio di questa classificazione è necessario chiarire i concetti di “Availability” (Disponibilità) e di “Reliability” (Affidabilità).

### 2.1.1 Reliability

Le Reliability è la probabilità che un prodotto o un servizio operi per un periodo specifico, sotto definite condizioni senza fallire. Maggiore il tempo, minore sarà questa probabilità (in base a come il sistema è progettato). Si è già parlato di come, in un data center, sia fondamentale la continuità del servizio.

Per un “Failure rate” (tasso di fallimento)  $\lambda$  costante, la reliability in funzione del tempo,  $R(t)$ , è:

$$R(t) = e^{-\lambda \cdot t}$$

Equazione 1. Reliability

### 2.1.2 Availability

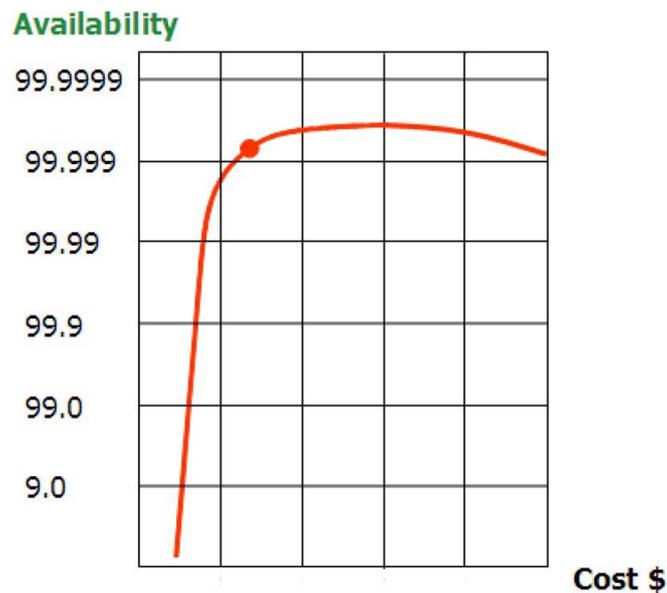
Collegato al concetto di Reliability c’è quello dell’Availability (Disponibilità): frazione di tempo in cui un componente o sistema riparabile è in grado di svolgere la sua funzione. L’Availability è definita come:

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

*Equazione 2. Availability*

- MTBF (Mean time between failures) =  $1/\lambda$
- MTTR (MEan time to repair)=Tempo medio necessario a riparare il componente per fare in modo che possa tornare a svolgere il suo servizio.
- $\lambda$  (Failure rate)= Numero di fuori servizio per unità di tempo.

Questo modello basato su Reliability e Availability può essere un ottimo strumento per valutare tutte le possibili opzioni a livello impiantistico. Ma c'è un altro fattore da tenere in considerazione: i costi.



*Figura 5. Availability vs Cost*

La figura 4 mostra l'andamento dell'Availability in funzione dei costi. Pur essendo una curva ipotetica, trasmette un concetto molto importante: una volta raggiunta un'Availability del 99,999%, aggiungere altri equipaggiamenti potrebbe non comportare un ulteriore aumento di A. Può accadere, infatti, che la complessità del sistema vada contro l'aumento della ridondanza. È molto importante trovare il punto che massimizza l'investimento in affidabilità e sicurezza del sistema.

#### RELIABILITY CALCULATIONS FOR TIERS DRAWINGS

Description of RBD	MTBF (hours)	Availability	Probability of Failure in 5 years
Tier 1 example	83,576	0.9999470	36.68%
Tier 2 example	114,379	0.9999512	31.42%
Tier 3 example	106,261	0.9999791	31.06%
Tier 4 example	1,336,104	0.9999976	3.01%

*Tabella 2. Livelli di reliability della "Tier" classification*

Abbiamo infine, la suddivisione in "Tier", con i relativi livelli di Availability. Risulta evidente, che la Tier classification è una linea guida per il design dei data centers. È uno strumento molto utile, che può essere utilizzato in contemporanea alla "Reliability engineering" per valutare le strutture più critiche. Per essere utilizzata richiede cinque fattori: MTBF, MTTR, A, R e il tempo. Ognuno di questi fattori è fortemente influenzato dalla definizione di "fallimento" all'interno di un sistema. Questo modello è molto utile, inoltre, per il confronto tra sistemi simili. Tuttavia la comprensione dei concetti di base è essenziale per modellare correttamente i sistemi e utilizzare i dati forniti, per giungere a decisioni e valutazioni corrette.

## 2.2 Classificazione in base alla taglia

Nel tentativo di stabilire un linguaggio comune quando si parla di taglia e densità di potenza nel settore dei data centers, il “Data Centers Institute” (DCI) ha sviluppato una serie di standard descritti in un documento. L’obiettivo dichiarato è quello di migliorare la chiarezza dal punto di vista delle comunicazioni nel mondo dell’industria. Il concetto di “dimensione” nei report dei data centers è talvolta definito dalla capacità di alimentazione, dalla fornitura dei servizi, dal numero di rack, dall’area dell’edificio o dall’area della sala di calcolo. Anche la densità può assumere diversi significati. Il DCI propone che nel contesto dei data centers, la taglia dovrebbe descrivere solo la dimensione dello spazio di calcolo, mentre la densità dovrebbe essere misurata con il carico di picco in kW.

La taglia, in termini di dimensione, è definita utilizzando la resa del rack e l’area dello spazio di calcolo. Nella tabella 3 sono catalogate le varie tipologie:

DATA CENTER SIZE			
Size Metric	Rack Yield	Compute Space	
		SQFT (ft <sup>2</sup> )	SQM (m <sup>2</sup> )
Mega	>= 9,001	>= 225,001	>= 22,501
Massive	3,001 – 9,000	75,001 – 225,000	7,501 – 22,500
Large	801 – 3,000	20,001 – 75,000	2,001 – 7,500
Medium	201 – 800	5,001 – 20,000	501 – 2,000
Small	11 – 200	251 – 5,000	26 – 500
Mini	1 – 10	1 – 250	1 – 25

Tabella 3. Classificazione per taglia

Se la resa del rack e lo spazio di calcolo in una struttura non corrispondono a una singola riga sul grafico, il DCI consiglia di utilizzare il numero più alto per determinare le dimensioni.

Per quanto riguarda la densità, il documento propone di usare la densità di picco misurata, piuttosto che quella di design o la densità media comunemente usata nei report. Lo standard tiene conto sia della densità del rack che di quella dello spazio di calcolo. Quest’ultima è definita come il rapporto tra il carico di picco misurato e la resa del rack.

Nella tabella 4 sono rappresentati i livelli di densità previsti dal documento:

DATA CENTER DENSITY		
Density Metric	Per Rack	Compute Space
Extreme	$\geq 16\text{kW}$	$\geq 16\text{kW}$
High	9 – 15 kW	9 – 15 kW
Medium	5 – 8 kW	5 – 8 kW
Low	0 – 4 kW	0 – 4 kW

Tabella 4. Classificazione per densità di potenza

### 3. CONSUMI ENERGETICI NEI DATA CENTERS

Il consumo energetico dei data centers è molto maggiore di quello degli spazi per uffici commerciali[2]. Negli USA sono stati condotti degli studi dal “Lawrence Berkley Laboratory” (LBNL) in 14 data centers. Questi studi hanno mostrato che la domanda, misurata come densità di potenza, dei data centers è nell’ordine di  $120\text{-}940\text{ W/m}^2$ , mentre quella degli spazi commerciali è di  $50\text{-}110\text{ W/m}^2$ . Il grande consumo energetico mette in luce, tuttavia, anche il grande potenziale di risparmio di energia tramite miglioramenti a livello di efficienze.

Per avere esempi pratici su cui basare l’analisi sono stati affrontati due casi studio di data centers realmente esistenti, per i quali sono stati analizzati i consumi, le perdite e le efficienze.

#### 3.1 Indicatori di prestazioni

Prima di iniziare l’analisi vera e propria è opportuno far luce su alcuni indicatori utilizzati nella valutazione delle efficienze energetiche dei data centers e nel confronto fra centri differenti. Per data centers di taglia diversa, ad esempio, il consumo per unità di area, non è un indicatore adatto per un confronto, in quanto lo stesso consumo di elettricità può essere distribuito su un’area più vasta. Due indicatori alternativi, che tengono conto delle infrastrutture globali e del sistema HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) sono:

- **M1:** Rapporto fra il consumo delle attrezzature IT e il consumo globale.

$$M1 = \frac{Kwh/year(IT)}{Kwh/year(Total)}$$

M1 è un indicatore efficiente della performance energetica globale, poiché esamina utilizzo degli strumenti IT relativamente alla composizione dei sistemi di supporto. Il consumo IT è il carico di elaborazione critico in un data center. Avere un sistema di supporto efficiente significa consumare meno energia. Un M1 alto corrisponde ad un data center efficiente energeticamente.

- **M2:** Rapporto tra il consumo HVAC e quello IT:

$$M2 = \frac{Kwh/year(HVAC)}{Kwh/year(IT)}$$

Simile all'M1, l'indicatore M2 è utilizzato per valutare l'efficienza del sistema HVAC in fase di funzionamento esaminando l'effettiva energia di raffreddamento per il sistema IT. In questo caso, un HVAC efficiente, corrisponde a un M2 relativamente basso.

### ***3.2 II PUE***

Nell'ambito dei data centers, per evitare confusione con il classico concetto di efficienza si è scelto, a livello internazionale, di introdurre un nuovo parametro, il PUE (Power Usage Effectiveness). Questo parametro aiuta a confrontare tra loro centri di elaborazione diversi e consente di farsi un'idea riguardo le loro prestazioni.

Il PUE è definito come il rapporto tra il totale dell'energia assorbita dall'intero data center e l'energia che effettivamente arriva alle apparecchiature IT. E' l'inverso di un'efficienza, per cui è sempre maggiore di 1 e diminuisce all'aumentare dell'efficienza energetica.

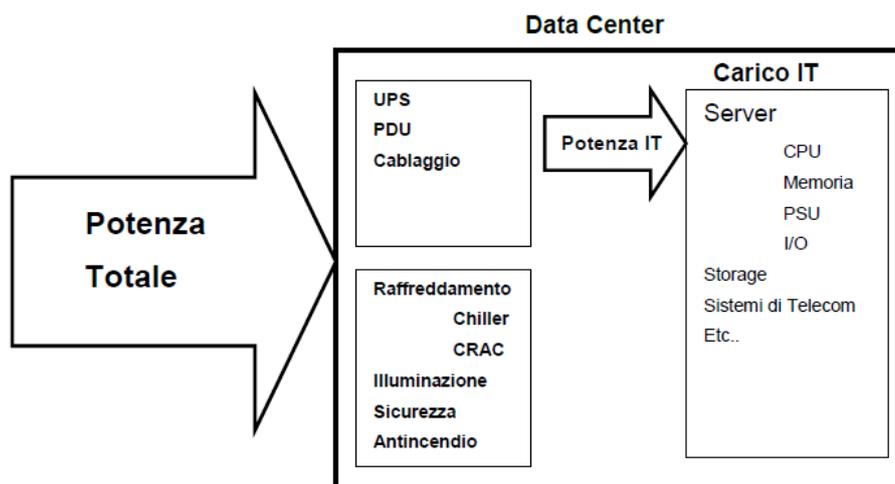


Figura 6. Suddivisione della potenza totale

$$PUE = \frac{\text{Potenza Totale}}{\text{Potenza IT}}$$

Come si può facilmente capire dalla figura 5, la potenza totale è la potenza elettrica che viene assorbita all'interno dell'intero data center e che quindi comprende la potenza IT, il condizionamento, l'alimentazione e tutti gli altri sistemi ausiliari.

La potenza IT è la somma di tutte le potenze assorbite dalle apparecchiature IT (server, unità di memoria, apparati di rete ecc.).

La misurazione del PUE può risultare un'operazione complicata per una serie di motivi:

- Nei data centers sono presenti dispositivi che assorbono energia, ma non è sempre chiaro come (o se) è necessario conteggiare i relativi dati di alimentazione nei calcoli dell'efficienza;
- Alcuni punti pratici per la misurazione dell'energia includono carichi non correlati al data center ma non separabili durante la misurazione;
- Per ottenere una stima adeguata, la misura deve essere seguita da un periodo di tempo piuttosto lungo, e non sempre è possibile farlo;
- Alcuni sistemi supportano una struttura a utilizzo misto e sono condivisi con altri dispositivi non correlati al data center, quindi non è possibile misurare direttamente la percentuale di energia attribuibile al data center;

Si deduce che l'uso del PUE come strumento di confronto tra data center differenti, dev'essere fatto in maniera ragionata, tenendo conto dei vari fattori che influiscono e del

metodo utilizzato per il calcolo. Se, ad esempio, si paragona l'efficienza di due data center, delle quali una è stata calcolata nei mesi estivi e l'altra nei mesi invernali, si intende facilmente che la comparazione non è adeguata.

### **3.3 Cooling Mode**

Altro fattore da considerare in un'analisi di efficienza energetica di un data center è il "Cooling Mode" (Modalità di raffreddamento).

Il consumo di energia del sistema di raffreddamento è influenzato dalle condizioni climatiche. In determinate condizioni dell'aria esterna, la necessità di raffreddamento meccanico può essere eliminata o ridotta, con conseguente riduzione del consumo energetico. Ciò è possibile grazie all'utilizzo di metodi di raffreddamento dell'ambiente naturale, che sono chiamati metodi di economizzazione o di "free cooling". I metodi più comuni sono: Direct Air Side Economizer (ASE), Indirect Air Side Economizer (IASE), Indirect Evaporative Cooling (IEC) e Indirect Water-Side Economizer (IWSE).

- **Logica di attivazione per "Free Cooling" e "Pre Cooling":** La modalità di "Free Cooling" inizia quando la temperatura di bulbo umido (WBT) dell'ambiente esterno scende sotto i 14°C e si mantiene al di sotto di questa soglia per almeno 30 minuti. Il "Free Cooling" viene stoppato, passando al "Pre Cooling", quando l'acqua refrigerata di ritorno dallo scambiatore è a una temperatura maggiore di 19,5 °C e si mantengono queste condizioni per almeno 10 minuti.
- **Logica di attivazione per il raffreddamento meccanico ("Mechanical cooling mode"):** Si passa dalla modalità di "Pre cooling" a quella di "Mechanical Cooling", quando la WBT dell'ambiente esterno, maggiorata di 3°C, risulta maggiore della temperatura dell'acqua refrigerata per almeno 30 minuti.

### 3.4 Caso Studio 1

I due data centers selezionati per l'analisi si trovano in due locali commerciali a Singapore, con superfici rispettivamente di 100 m<sup>2</sup> e di 1048 m<sup>2</sup>. In questo studio il termine "Energy Performance" rappresenta una valutazione complessiva dell'utilizzo dell'energia all'interno delle infrastrutture[2]. Ecco come sono ripartite le superfici nei due data centers:

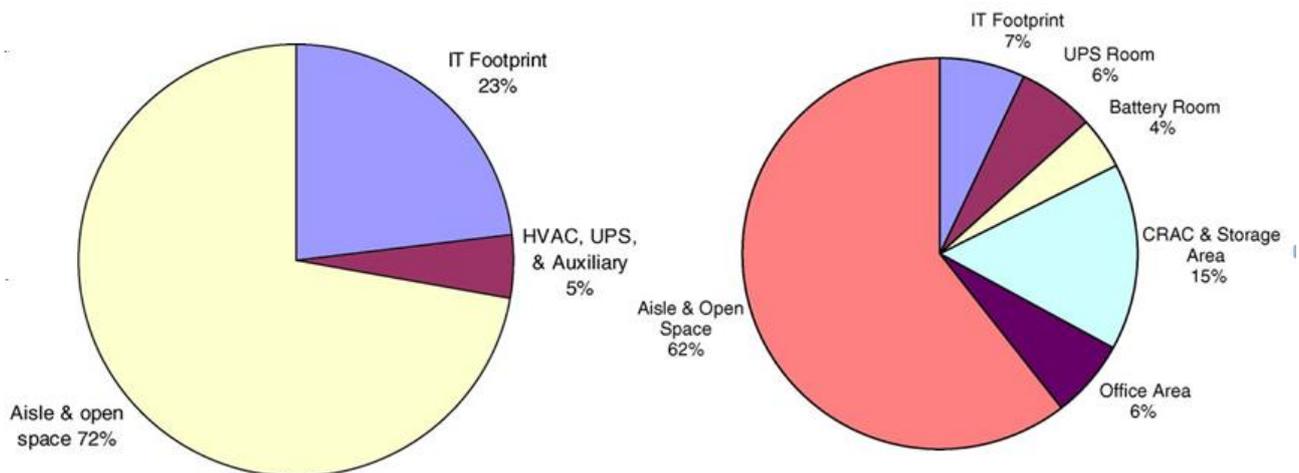


Figura 7. Suddivisione delle superfici DCI e DCII

Il consumo energetico delle apparecchiature IT è misurato grazie a un monitoraggio sull'unità UPS, in input e output. Le apparecchiature HVAC con motore, come compressori, pompe e ventole, hanno correnti simmetriche in differenti fasi. Il consumo del sistema HVAC può, quindi, essere ottenuto moltiplicando per tre l'energia di ogni singola fase. Il periodo di monitoraggio scelto è una settimana, poiché è il periodo minimo per ottenere risultati ragionevoli da un punto di vista delle efficienze. Poiché a Singapore non c'è differenza tra le stagioni, un monitoraggio a lungo termine non è necessario.

Iniziamo, dunque, l'analisi con il confronto tra le strutture dei due data centers:

- **Alimentazione elettrica:** Sistemi UPS e HVAC sovradimensionati e fattori di sicurezza hanno portato a sovrastimare la domanda di energia. I risultati mostrano che nel DCI l'alimentazione per le apparecchiature IT e HVAC, è stata sovradimensionata, rispettivamente di un fattore 4 e 6. Nel DCII, l'alimentazione per CRAC (Computer room Air Conditioning) e FCU è sovradimensionata di un fattore 4, mentre le apparecchiature IT di un fattore 10.

- Contesto Ambientale:** Le temperature di bulbo secco misurate nei locali sono di 24,4 °C e 2,9°C. Sono entrambe nel range raccomandato da ASHRAE. L'umidità relativa misurata in entrambi i DC è intorno al 60%, ovvero maggiore del 5% rispetto al limite superiore delle linee guida di ASHRAE. In particolare nel DCII si registra una significativa fluttuazione dei valori, dal 55% all'80%: la possibile spiegazione è che l'unità CRAC ha la funzione di controllo dell'umidità e potrebbero entrare in conflitto quando il livello di umidità varia in base alla superficie e al tempo.

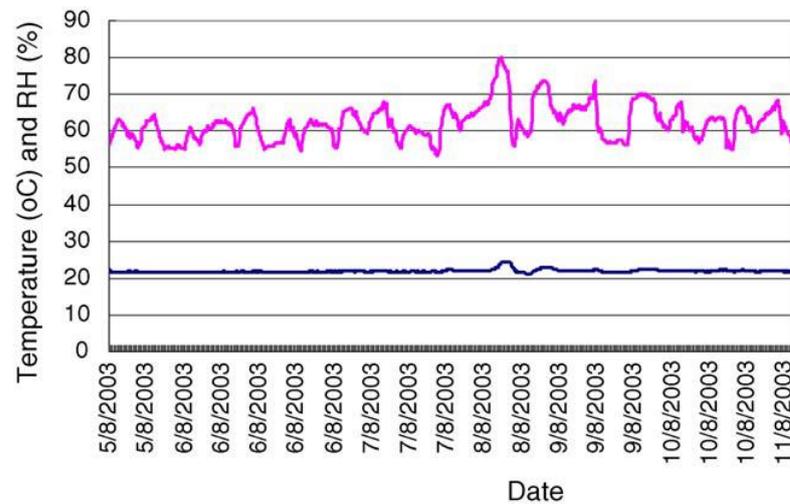


Figura 8. Condizioni ambientali DCII

- Consumo energetico:** Per confrontare i consumi dei due DC, è stata svolta un'analisi di breve periodo sui principali sistemi. Sono stati monitorati il consumo di energia (kWh) e il carico di potenza (kW) con intervalli di 10 minuti, per una settimana. Dati un carico IT costante e delle condizioni climatiche non stagionali, sono stati estrapolati i consumi di energia.

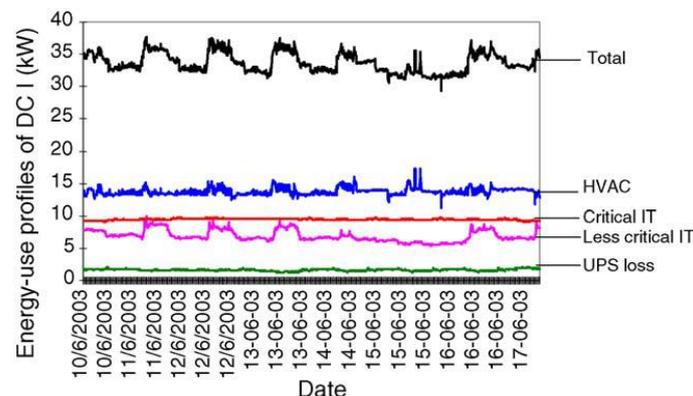


Figura 9. Profilo consumi DCI

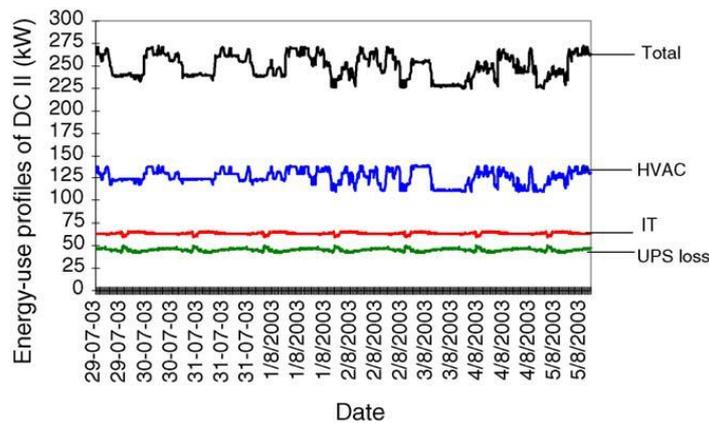


Figura 10. Profilo consumi DCII

Dato il condizionamento del sistema UPS, il carico delle apparecchiature IT appare costante in entrambi i DC, fatta eccezione per le apparecchiature meno critiche del DCI. Questo si spiega con il fatto che nelle sere e nel weekend, quando gli impiegati non sono negli uffici, le apparecchiature IT sono comunque in funzione e consumano lo stesso quantitativo di energia che consumano durante le ore lavorative. Anche il sistema HVAC deve sempre operare per mantenere le condizioni ambientali costanti: questo spiega i consistenti consumi legati al sistema HVAC in entrambi i DC.

Altro dato molto importante è l'UEI (energy usage index), che come si nota è, circa, 3 volte maggiore nel DCI. Ciò può essere attribuito, principalmente, alla maggior superficie del DCII e quindi a un minore tasso di occupazione dell'area.

Il DCII presenta un carico IT ( $W/m^2$ ) maggiore del DCI: la ragione è che nel DCI, parte delle attrezzature IT è poggiata su tavoli e scaffali, mentre nel DCII tutto l'equipaggiamento IT è ospitato in scaffali, che aumentano la densità di potenza. Si nota che il sistema HVAC è uno dei sistemi che consuma di più, soprattutto per via delle inefficienze. Si può notare analizzando il rapporto tra consumo HVAC e IT. Nel DCI, per ogni kWh di calore emesso dal sistema IT, il sistema HVAC consuma 0,84 kWh, mentre nel DCII questo consumo è di 2 kWh.

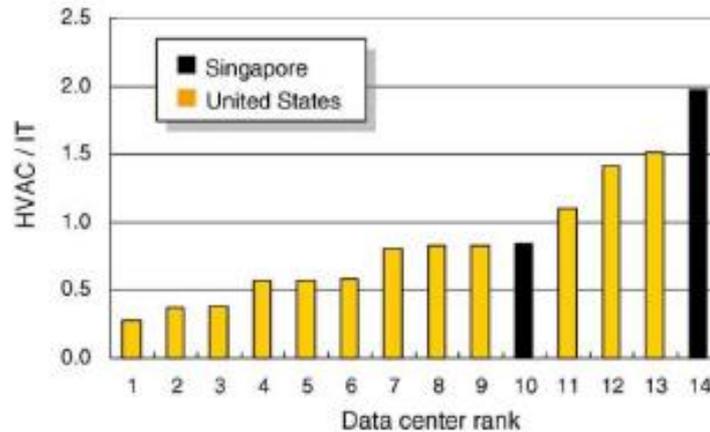


Figura 11. PUE

Ci sono diverse ragioni dietro questa inefficienza: la grande superficie utilizzata, l'inappropriato posizionamento del termostato, la temperatura bassa e irregolare degli ambienti, le caratteristiche del sistema di distribuzione dell'aria. Tuttavia la causa principale è il sovradimensionamento delle apparecchiature, che in questo caso, risulta essere di un fattore 5. Il DCI presenta delle prestazioni migliori da questo punto di vista, dovute a una maggiore compattezza degli spazi e soprattutto ad un accurato dimensionamento del sistema HVAC.

In un processo di paragone tra efficienze energetiche sui data centers, la domanda da porsi è se sia corretto o no mettere a paragone i consumi dei data centers di diversi paesi o regioni dove le condizioni climatiche sono diverse.

Per rispondere a questo quesito, è stata svolta un'analisi sulla correlazione tra la temperatura di bulbo asciutto dell'ambiente esterno e la richiesta di potenza del sistema HVAC in entrambi i data centers in esame.

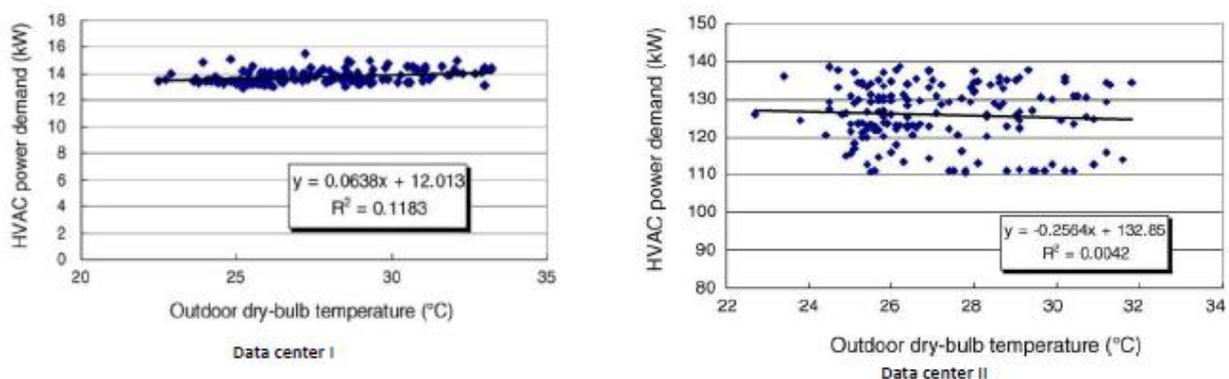


Figura 12. Consumo HVAC in funzione delle condizioni esterne

Come mostra la figura 12 non c'è una correlazione significativa tra condizioni climatiche esterne e consumo energetico. È stato infatti calcolato che nel DCI il carico esterno corrisponde al 5,7% del carico interno di calore, mentre nel DCII è del 6,4%. È dunque evidente che il calore generato dalla apparecchiature, in particolare IT, rappresenta il contributo principale al carico di raffreddamento.

Altro fattore da tenere in considerazione è la ridondanza del sistema UPS e le sue eventuali inefficienze. Nel DCII, circa il 40% dell'elettricità che passa dall'UPS viene dissipata all'interno del sistema UPS stesso, per un valore di circa 45 kW. Con delle migliorie l'efficienza del sistema UPS può crescere fino al 95% e circa 40 kW di potenza possono essere risparmiati. In un anno, possono essere risparmiati circa 344790 kWh di energia elettrica.

### ***3.5 Caso studio 2***

Il presente studio si propone di effettuare un'analisi delle prestazioni di un data center di nuova progettazione e costruzione e di identificare le opportunità di risparmio energetico. Le indagini vengono condotte sulla base dei dati completi di un anno del 2017 acquisiti dal Data Center Infrastructure Management (DCIM).

L'analisi è annuale, ma sono stati considerati in maniera particolare 3 giorni: il giorno più caldo dell'estate (3 Luglio 2017), il giorno più freddo dell'anno (15 Gennaio 2017) e un giorno di transizione (10 Marzo 2017). La suddivisione dei consumi è rappresentata nella figura 13.

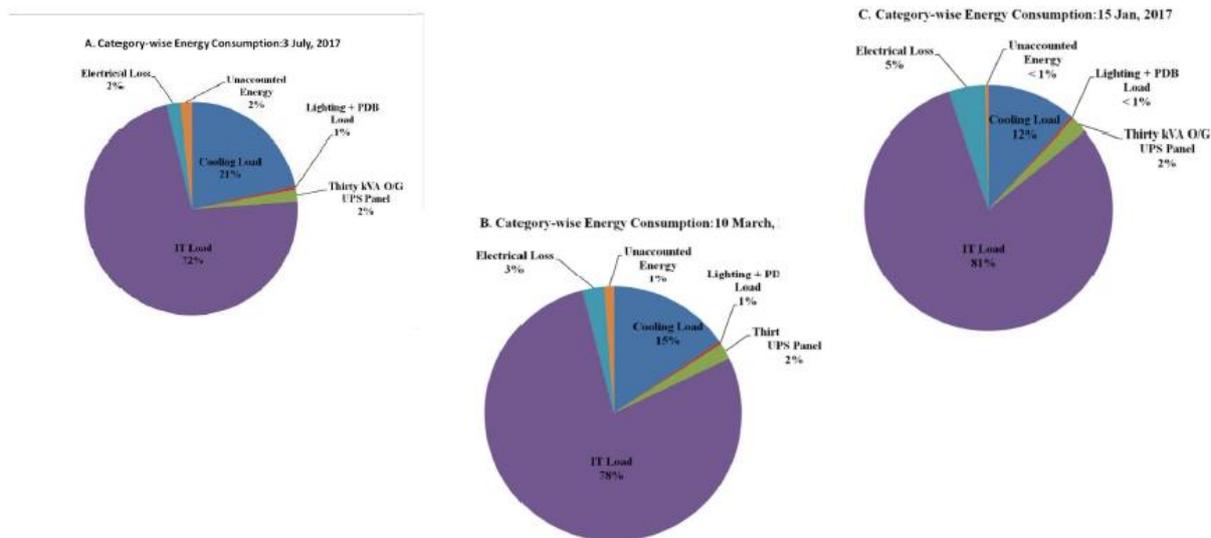


Figura 13. Suddivisione dei consumi

Appare abbastanza evidente che, anche se non di molto, il carico di raffreddamento varia in base alla temperatura esterna e l’impatto del carico delle apparecchiature IT varia di conseguenza.

Energy consumption, kWh.				
S.N.	Category	15-Jan	10-Mar	3-Jul
1.	Cooling Load	673.0	975.4	1542.6
2.	Lighting + PDB Load	23.0	27.0	40.1
3.	Thirty kVA O/G UPS Panel	124.4	129.4	131.4
4.	IT Load	4696.3	4942.5	5204.3
5.	Electrical Loss	276.8	175.5	152.0
6.	Unaccounted Energy	25.4	75.3	124.9
	<b>Total Facility Energy</b>	<b>5819.1</b>	<b>6325.3</b>	<b>7195.5</b>

Tabella 5. Consumi

Analizzando ancor più nel dettaglio questi tre giorni sono stati presi in considerazione i consumi dei vari componenti del sistema di raffrescamento in relazione alla temperatura esterna.

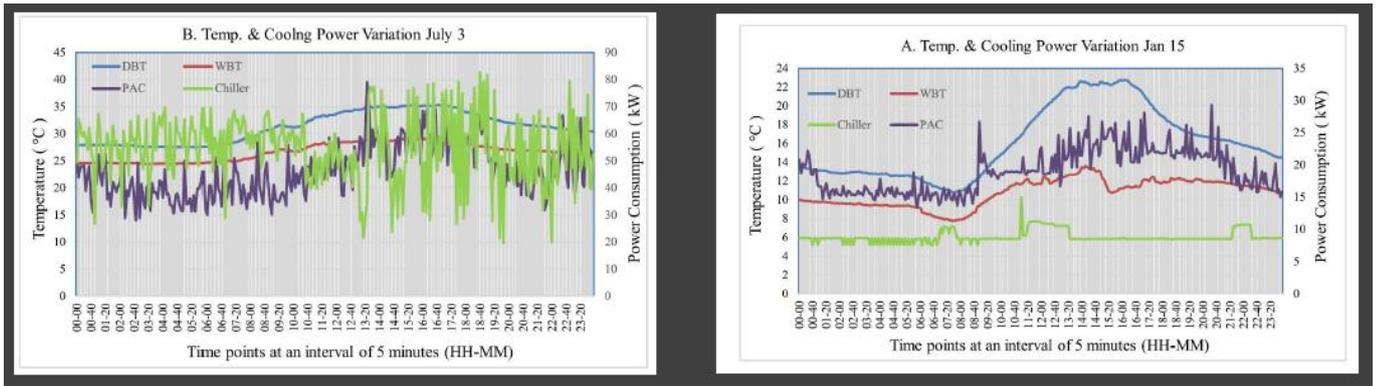


Figura 14. Consumi per raffrescamento della temperatura esterna 3 Luglio e 15 Gennaio

La figura 14 rappresenta le temperature ambiente (di bulbo secco e di bulbo umido) e il consumo del Chiller e del PAC (“Precision air conditioning”), prendendo in analisi i giorni 15 Gennaio e 3 Luglio. Il 15 Gennaio la WBT è al di sotto dei 14°C per tutto il giorno, mentre la DBT rimane intorno ai 25°C per tutto il giorno del 3 Luglio, risultando in un consumo maggiore. Il consumo di PAC e Chiller include anche quello delle attrezzature ausiliarie: il 15 Gennaio, infatti, quando il Chiller non è attivo, il consumo è dovuto ai soli ausiliari.

Un’analisi simile è stata fatta per un altro giorno, il 17 Febbraio, dove si può osservare la transizione tra i vari “Cooling mode”, come mostra la figura 15.

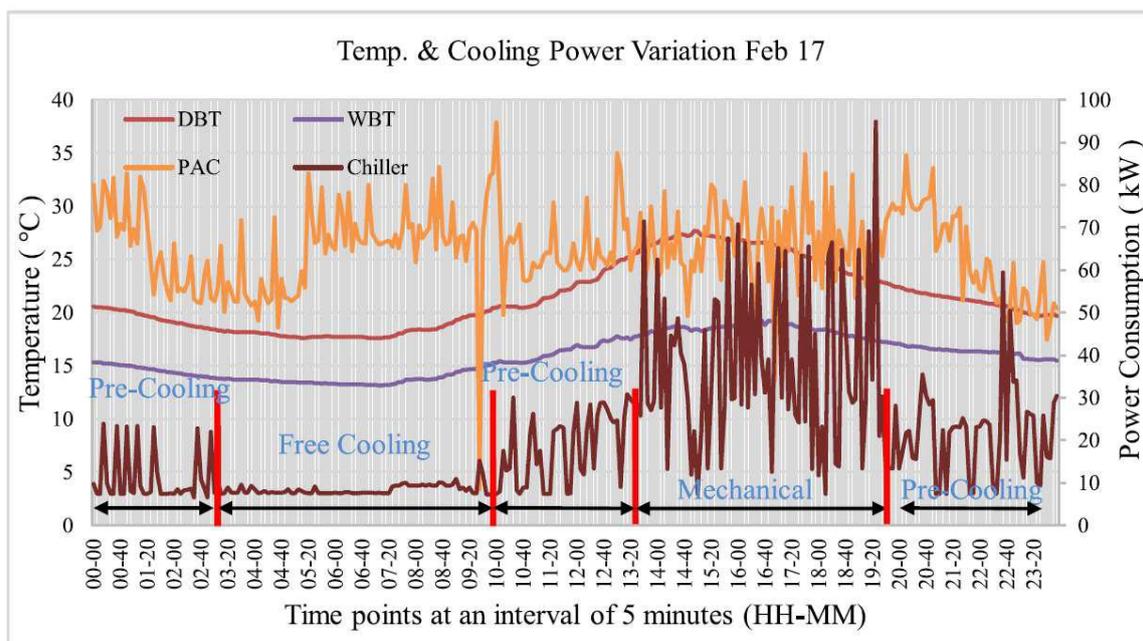


Figura 15. Consumo per raffrescamento in funzione della temperatura esterna 17 Febbraio

Quando la WBT è al di sotto dei 14°C, il Chiller rimane spento e la modalità di Free-cooling è attiva. Come detto in precedenza, il sistema passa alla modalità di Pre-cooling quando l'acqua fredda ritorna ad una temperatura maggiore di 19,5°C per almeno 10 minuti. Si nota come la potenza del Chiller varia in maniera significativa a seconda della modalità di raffreddamento in atto.

### 3.5.1 Analisi annuale

Come detto precedentemente, per un'analisi completa a livello di efficienza, serve un arco temporale più lungo, per fare in modo di poter avere un calcolo del PUE relativamente corretto.

La figura 16 rappresenta i consumi energetici, divisi per categoria, durante l'arco temporale di un anno.

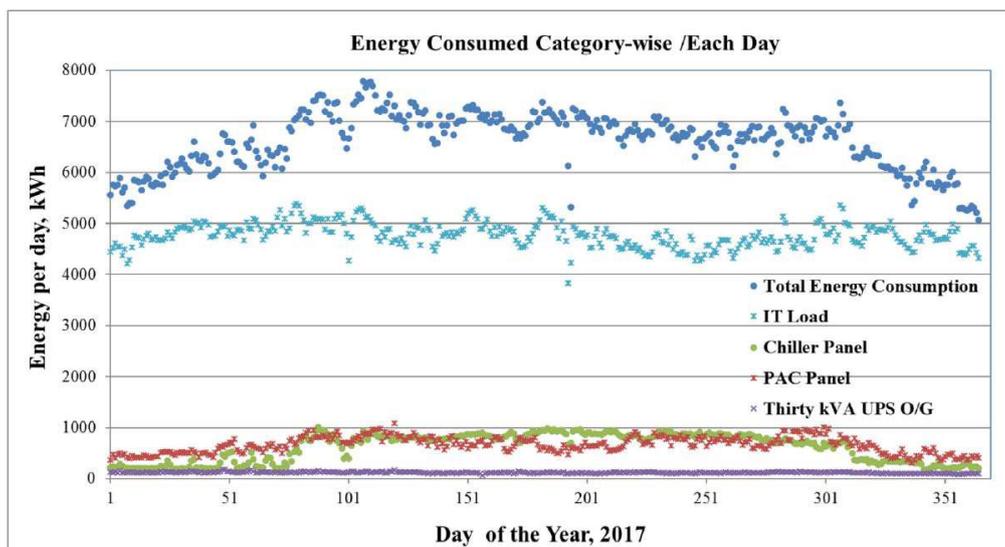


Figura 16. Carico annuale

Ci sono alcuni giorni in cui il consumo IT sembra minore della media, dovuto probabilmente a malfunzionamenti e/o alcune ore di shut down del sistema. Il carico IT dipende dal carico di ricerca dei computer, attività amministrative, carichi di lavoro internet e dalla domanda/numero di utenti collegati (facoltà, scuole, uffici, ecc).

La variazione del consumo totale di energia è ben spiegata dal fatto che il carico di raffreddamento scende nei mesi invernali, e dalla variazione delle modalità di raffreddamento.

Per comprendere meglio la natura dell'andamento del consumo energetico per raffrescamento, nelle figure sottostanti sono rappresentati gli andamenti dei consumi di PAC e Chiller e le variazioni del valore del PUE, sempre su base annua.

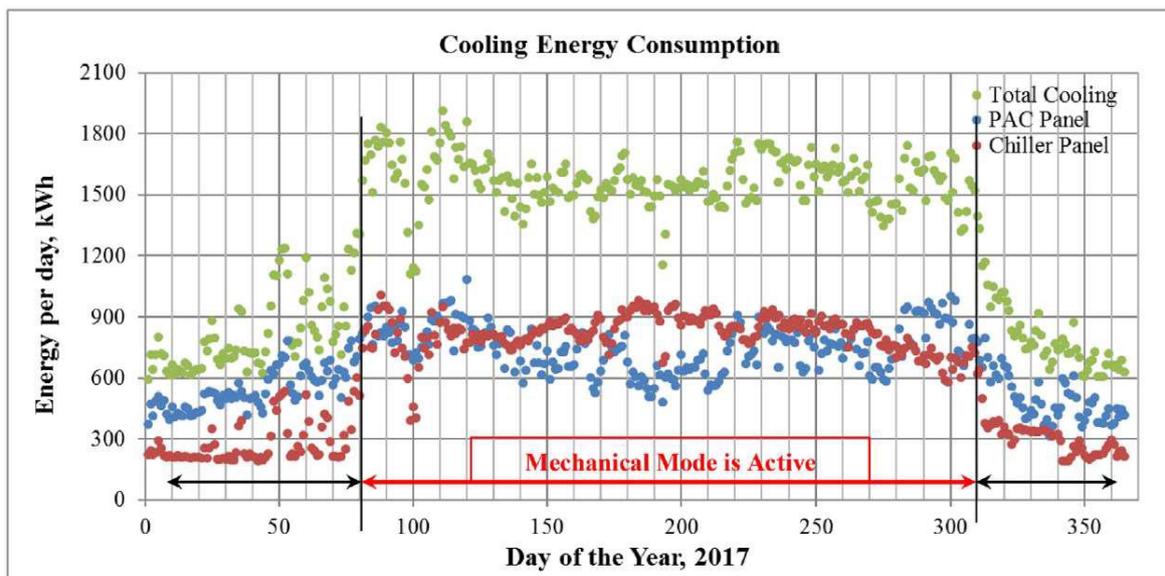


Fig. 16. Carico annuale per raffrescamento

La parte contrassegnata dalla freccia rossa rappresenta la zona in cui il “Mechanical-cooling” è attivo ed è la zona in cui i carichi sono maggiori e il Chiller lavora in continuo. Ai lati troviamo le regioni in cui il Chiller passa in “Free-cooling” (primi e ultimi mesi dell’anno) per circa 2560 ore (circa 110 giorni) e in “Pree-cooling” per 1032 ore (circa 42 giorni), facendo scendere il consumo di energia per raffrescamento.

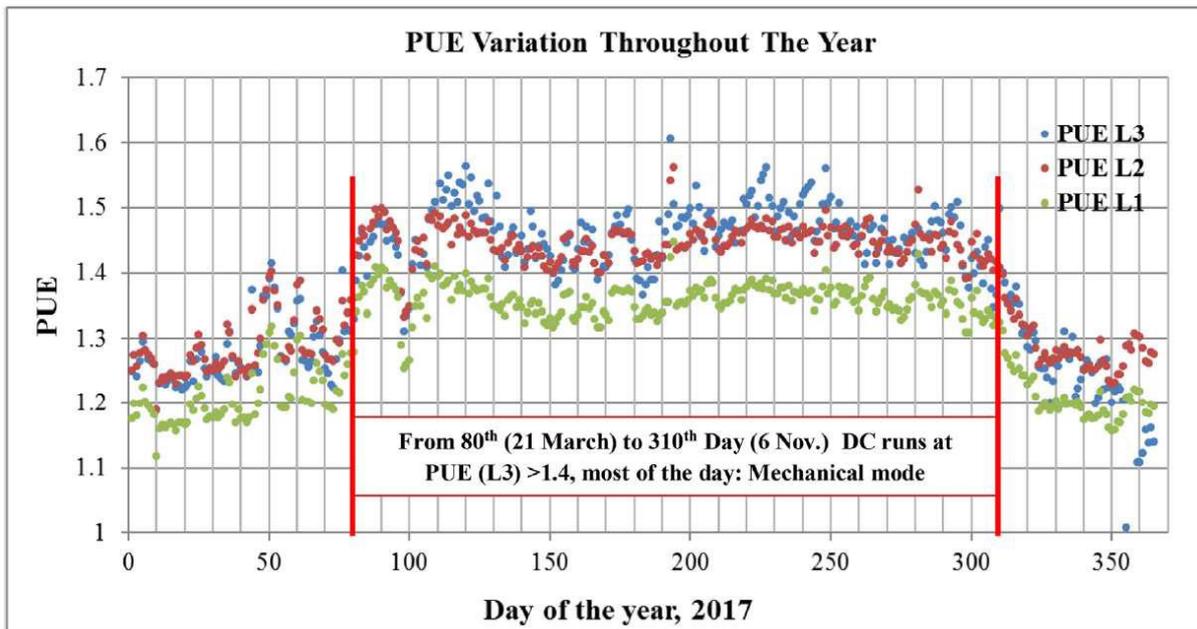


Figura 17. Variazione annua del PUE

La figura 17 la variazione del PUE durante l'anno. Le variazioni del consumo di energia dipendono, primariamente, dalle variazioni del carico di raffreddamento dovute alla variazioni stagionali del clima, della temperatura esterna e dall'umidità relativa. Si vede chiaramente che la zona di "Free-cooling" e "Pre-cooling", corrisponde a un PUE minore di 1.4. Il data center lavora con un PUE maggiore di 1.4 per 230 giorni l'anno, ovvero per il 63% del tempo.

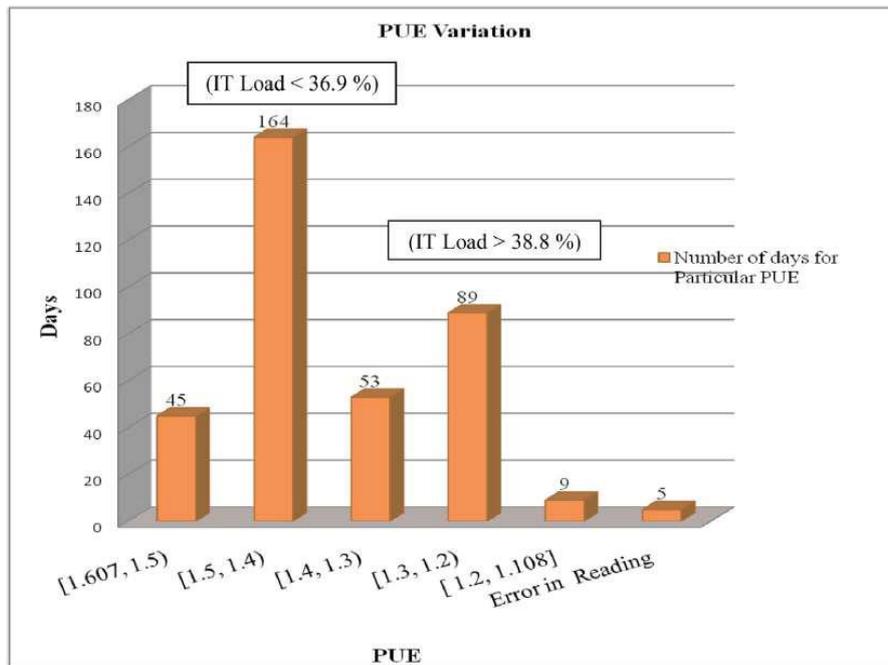


Figura 18. Variazioni del PUE nei giorni dell'anno.

La figura 18 rappresenta nel dettaglio le variazioni di PUE nei vari giorni dell'anno. Il carico IT di targa è di 540 kW e di solito lavora al di sotto del 40% del carico totale. Il data center lavora con un PUE maggiore di 1.4 quando il carico è più piccolo del 36.9% e con un PUE minore di 1.3 con il carico con il carico IT maggiore del 38.8%. Il consumo totale diminuisce con le basse temperature invernali e porta a una diminuzione del PUE. D'altra parte il PUE aumenta quando il carico IT diminuisce per via del funzionamento a basso carico dei sottosistemi, come ad esempio durante i periodi di vacanza nelle scuole. Il data center lavora con un PUE medio annuo di 1.38.

Infine, la figura 19, riporta la suddivisione del consumo energetico annuale.

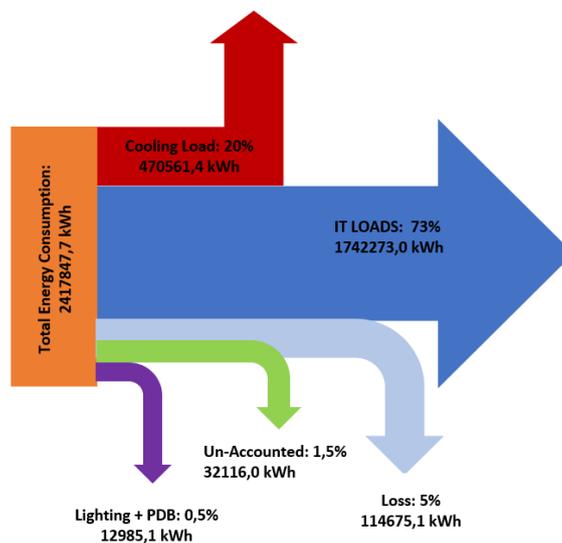


Figura 19. Suddivisione dei consumi annuali

Il carico IT rappresenta il 73% del totale, mentre quello per raffrescamento il 20%. Il 5% sono le perdite elettriche.

#### **4. Stato attuale dei sistemi di alimentazione dei Data Centers**

È molto complicato progettare un sistema elettrico di celle a combustibile sufficientemente affidabile per l'uso nei data center, che richiedono tempi di attività superiori al 99%[3]. Un tale sistema potrebbe ridurre le emissioni e aumentare l'efficienza del data center, ma l'affidabilità e la disponibilità di tale sistema deve essere analizzata con grande attenzione.

Attualmente si utilizza un'ampia attrezzatura di backup (UPS) per garantire la disponibilità di energia elettrica; un'alternativa progettuale proposta utilizza più sistemi di celle a combustibile, ognuno dei quali è a supporto di un numero limitato di server, in modo da eliminare le apparecchiature di backup, a condizione che vengano raggiunti i livelli di affidabilità e disponibilità richiesti.

È stata svolta un'analisi di affidabilità[3] di sistemi di celle a combustibile ed è emerso che i livelli di "Reliability e "Availability" necessari possono essere raggiunti solo con sistemi con componenti ridondanti. Una volta dimostrato che l'affidabilità desiderata era raggiungibile attraverso una combinazione di componenti, è stata intrapresa un'analisi di programmazione dinamica per valutare l'allocazione ideale dei singoli componenti.

L'obiettivo dell'analisi effettuata non è solo quello di sviluppare un sistema in grado di alimentare in maniera affidabile un data center, ma anche di mettere in luce un metodo di progettazione più sostenibile per i data centers.

Le celle a combustibile non sono l'unica opzione per la generazione di energia pulita: le tecnologie rinnovabili come l'eolico e il solare rappresentano una valida alternativa, ma non sono forme di energia adatte a questa applicazione in quanto la loro natura intermittente ne inibisce la capacità di soddisfare i requisiti di affidabilità del data center, senza grandi quantità di energia, capacità di archiviazione e apparecchiature di backup inefficienti.

Le tecnologie dell'informazione e della comunicazione (TIC) hanno un potenziale di riduzione delle emissioni molto importante[4]. I data centers hanno il tasso di crescita delle emissioni più elevato nel settore ICT, con un aumento del 7% annuo. Con la crescita nell'utilizzo di Internet, i data centers richiedono sempre più energia elettrica.

I tradizionali data center ricevono l'energia dalla rete elettrica e richiedono generatori diesel di riserva e contribuiscono, quindi, all'emissione di inquinanti. È importante che i data center vengano alimentati da una tecnologia che produca una bassa emissione di inquinanti e di CO2. I tradizionali sistemi sono costosi da installare, utilizzare e mantenere. La rete elettrica fornisce il 99,9% dell'energia nel tempo di funzionamento (Uptime). Per ottenere tempi di attività e affidabilità così elevati, facendo affidamento all'elettricità di rete, i sistemi di backup diventano molto complessi.

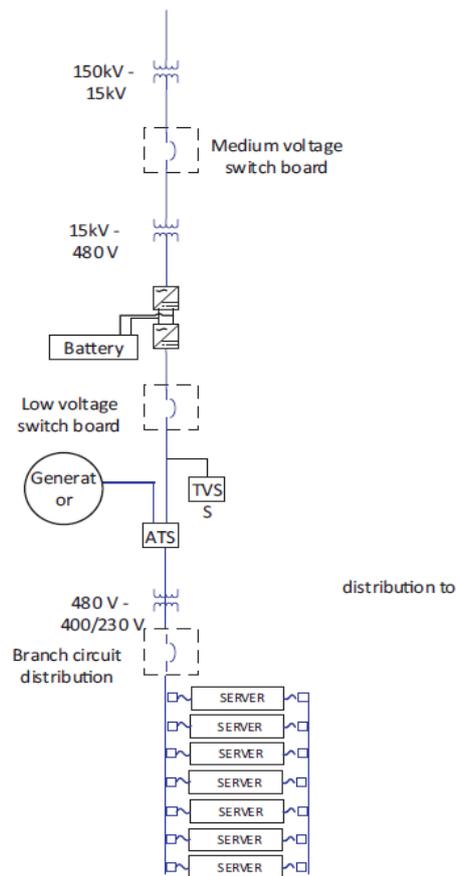


Figura 20. Tipico sistema di alimentazione di un Data Center.

La figura 20 mostra il layout di un tipico sistema di alimentazione. In un sistema di questo tipo molti elementi di backup, come batterie, UPS o generatori diesel sono necessari per garantire il livello di disponibilità richiesto.

A causa delle inefficienze dell'impianto elettrico e dei data center stessi, il 20% del carburante in ingresso in una centrale elettrica consente di alimentare un solo server.

Data Centers che utilizzano energia pulita come il fotovoltaico, l'eolico o le celle a combustibile in parallelo con i servizi della rete elettrica hanno il potenziale di ridurre le emissioni di gas serra, e proprio questa tipologie di soluzioni sono stati costruiti e studiati[5].

## **5. Celle a combustibile nei Data Centers**

Di solito, migliorare l'Availability di un data center richiede maggiori infrastrutture, e quindi maggiori investimenti. Tuttavia, esiste un modo per tagliare infrastrutture e costi e contemporaneamente aumentare la disponibilità del DC, migliorandone l'efficienza energetica.

L'utilizzo di celle a combustibile in integrazione al sistema IT di un data center permetterebbe di eliminare la rete di distribuzione (con le sue relative perdite) con un'efficienza globale del 53%[6]. Questa efficienza è stata calcolata considerando l'intera filiera dell'energia, dall'impianto di alimentazione, alla rete di distribuzione fino all'unità di "Power supply" interna al sistema.

È possibile dimostrare che si possono ottenere sistemi a basse emissioni e bassi costi, ma ad elevata efficienza tramite l'utilizzo di Fuel Cells di taglia medio piccola;

basti pensare che, negli ultimi anni, le Fuel Cells si sono diffuse in diversi settori in sostituzione della rete elettrica, come forma di energia green[7] [8]. Negli Stati Uniti, ad esempio, la maggior parte delle applicazioni delle Fuel Cells sono state sviluppate in California, con il supporto del SGIP (California's Self Generation Incentive Program)[9].

### ***5.1 Fuel Cells: Pro e Contro***

Le celle a combustibile rappresentano una soluzione molto promettente per l'alimentazione dei Data Centers. Come detto precedentemente, l'utilizzo di celle a combustibile

permetterebbe di eliminare buona parte del sistema di distribuzione dell'energia elettrica, insieme alle sue inefficienze e alcuni suoi onerosi componenti, come trasformatori ad alta tensione, quadri elettrici e alimentatori AC-DC.

Ma vediamo più nel dettaglio le ragioni per cui le Fuel Cells sono la miglior forma di energia alternativa per l'alimentazione di un Data Center:

- La loro funzione non è legata al clima e/o agli agenti atmosferici, come accade per esempio con Fotovoltaico o Eolico.
- Una diretta conseguenza è il fatto che l'Availability di un sistema di celle a combustibile raggiunge livelli maggiori del 99,999%[10], persino più alto di quello della rete di distribuzione che è del 99.9%. Come visto in precedenza, questo è un fattore fondamentale per il funzionamento di un Data Center.
- Oltre ad avere efficienze elevate, le Fuel Cells sono più "green" dei tradizionali sistemi di generazione. Secondo alcuni studi si potrebbero ridurre le emissioni dei principali fattori inquinanti: ad esempio le emissioni di CO2 potrebbero ridursi del 49%, del Monossido di Azoto del 91%, Monossido di Carbonio del 68% e composti organici volatili del 93%[11].
- Bassi costi operativi. L'elettricità fornita da un sistema FC è più economica di quella acquistata dalla rete di distribuzione.

## ***5.2 Tipologie di Fuel Cells***

Esistono cinque tipi di celle a combustibile a seconda dell'elettrolita e dei processi utilizzati:

- Phosphoric acid fuel cell (PAFC)
- Alkaline fuel cell (AFC)
- Proton exchange membrane fuel cells (PEMFC)
- Molten carbonate fuel cells (MCFC)
- Solid oxide fuel cells (SOFC)

Il progresso tecnologico delle celle a combustibile è stato sorprendente negli ultimi decenni. I sistemi più moderni sono stati progettati con prezzi abbastanza bassi e una densità di potenza abbastanza alta da far aumentare la domanda dei consumatori[12].

Delle varie tipologie di celle a combustibile, le SOFC e le PEMFC sono le migliori opzioni per l'installazione in un Data Center. Nella figura 21 vediamo uno schema di funzionamento.

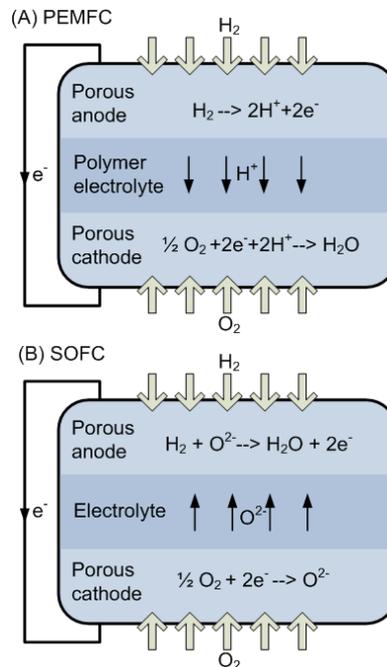


Figura 21. Schemi di funzionamento di una PEMFC (A) e una SOFC (B).

I vantaggi delle PEMFC includono un'alta densità di potenza, basse temperature e un buon ciclo di start-up. Gli svantaggi includono catalizzatori costosi, scarsa tolleranza all'avvelenamento e problemi di gestione dell'acqua.

Tra i vantaggi di una SOFC troviamo la flessibilità del combustibile (non troviamo limitazioni al solo idrogeno) catalizzatori composti di metalli non preziosi (e quindi meno costosi rispetto alle PEMFC), e la produzione di calore di alta qualità per applicazioni di cogenerazione. Il principale svantaggio sono le alte temperature di lavoro, che comportano la necessità di materiali resistenti ai cicli termodinamici a temperature elevate e quindi più costosi. Tutte le caratteristiche delle due tipologie di celle a combustibile sono sintetizzate nella tabella 6.

	SOFC	PEMFC
Efficiency	50% - 60%	40% (incl. reformer)
Power range (kW)	10-100k	0.001-1k
Fuel	Natural gas or Hydrogen	Hydrogen
Internal reforming	Yes	No
CO tolerance	Fuel	Poison (<50ppm)
Balance of plant	Moderate	Low-moderate
Advantages	High efficiency	Load following, fast on/off

Tabella 6. Caratteristiche di PEMFC e SOFC.

Bisogna inoltre considerare che, l'utilizzo di sistemi di celle a combustibile richiede una serie di componenti aggiuntivi che completano il sistema. Di seguito uno schema nella figura 22.

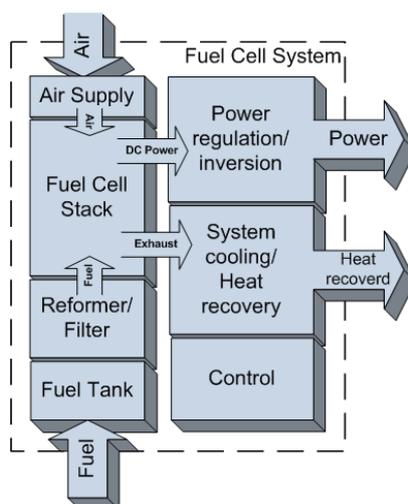


Figura 22. Schema di un sistema Fuel Cell.

In dettaglio, un tipico schema di celle a combustibile comprende vari sottosistemi, oltre a quello delle Fuel Cells stesse:

- Sottosistema di gestione termica.
- Sottosistema di erogazione/lavorazione del combustibile.
- Sottosistema di potenza.

Nell'analisi di un sistema vanno dunque considerati: affidabilità, consumi e costi di questi sottosistemi[6].

### 5.3 Architettura del sistema.

La figura 23 mette a confronto lo schema di alimentazione di un tradizionale Data Center e con lo stesso alimentato da un sistema di celle a combustibile.

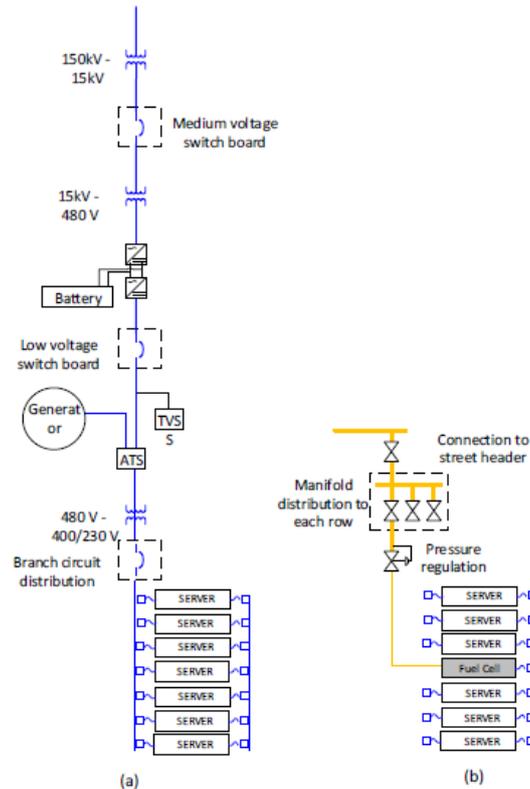


Figura 23. Paragone tra un sistema tradizionale (a) e un sistema con Celle a Combustibile alimentate da Gas naturale.

In un Data Center tradizionale il sistema di alimentazione deve essere collegato ai sistemi di backup, e la corrente elettrica va convertita più volte. Al contrario un sistema di Fuel Cells necessita della sola rete di gas naturale (o qualunque altro sia il combustibile utilizzato) e di diversi livelli di valvole per mantenere la pressione, in quanto le celle a combustibile stesse forniscono ridondanza e alimentazione di backup.

Si può notare, osservando la Figura 23, che oltre alla rimozione delle perdite dovute ai vari elementi del sistema di distribuzione, utilizzando le Fuel Cells si riesce a risparmiare spazio fisico e aumentare, quindi, la densità di potenza. Oltre il 40% della superficie interna di un tradizionale Data Center è dedicato alle apparecchiature del sistema elettrico come: generatori, UPS, trasformatori, adattatori ecc[6].

## ***5.4 Capacità di carico delle Fuel Cells.***

Uno dei concetti fondamentali per l'utilizzo delle Celle a combustibile riguarda la loro capacità di adattarsi al carico. Le Fuel Cells stesse, di solito, sono in grado di rispondere a rapidi cambiamenti di carico grazie alle elevate velocità di reazione[13]. I processi interni alle Fuel Cells si verificano, in genere in periodi di tempo nell'ordine dei millisecondi[14]. Il problema principale è che il processo di trattamento e distribuzione del combustibile non è rapido quanto le trasformazioni elettrochimiche. Quindi, i principali problemi di carico si hanno quando la Cella non è in grado di soddisfare sia l'alimentazione esterna che la propria domanda di combustibile. Eventuali ritardi possono essere associati a problemi dei vari sottosistemi e in questo caso, l'efficienza della cella risente fortemente di quelle dei sottosistemi[14]. La risposta di un sistema di SOFC o PEMFC è principalmente limitata dall'efficienza del sistema di processo del combustibile e dalla quantità di idrogeno presente nell'anodo. Durante un transitorio è fondamentale che ci sia sufficiente quantità di idrogeno tale da sostenere il voltaggio della cella ed evitare eventuali danni dovuti alla mancanza di carburante (questo può accadere se il combustibile è consumato dalle reazioni elettrochimiche più velocemente di quanto questo venga fornito dal sistema di distribuzione).

Diversi studi hanno dimostrato che un sistema di SOFC, con adeguati sottosistemi di controllo è in grado di adattarsi ai cambiamenti di carico improvvisi[15].

Per un'integrazione di un sistema di Fuel Cell è necessario uno studio attento dei transitori all'interno di un Data Center. È stato notato che il consumo di un data Center può avere variazioni dovute a fluttuazioni del carico o a eventi di ON/OFF dei server[6].

### ***5.4.1 Modifiche istantanee del carico***

Il carico del Data Center può variare quasi istantaneamente per via di una variazione della percentuale di utilizzo della CPU da 0% al 100% in un arco di tempo di millisecondi. Questi picchi possono causare fluttuazioni del voltaggio della cella, che però possono essere assorbiti dai condensatori interni.

### 5.4.2 Modifiche del carico a breve termine

Solitamente sono necessari diversi secondi per aumentare o diminuire il carico di una cella, in base alle variazioni. La figura 24 mostra il consumo energetico di una tipologia di Server con due CPU e 98 GB di memoria[6]. In situazioni in cui il server necessita un riavvio o un'accensione a freddo, la cella a combustibile deve essere in grado di seguire la variazione improvvisa di potenza, e ciò potrebbe richiedere una batteria esterna.

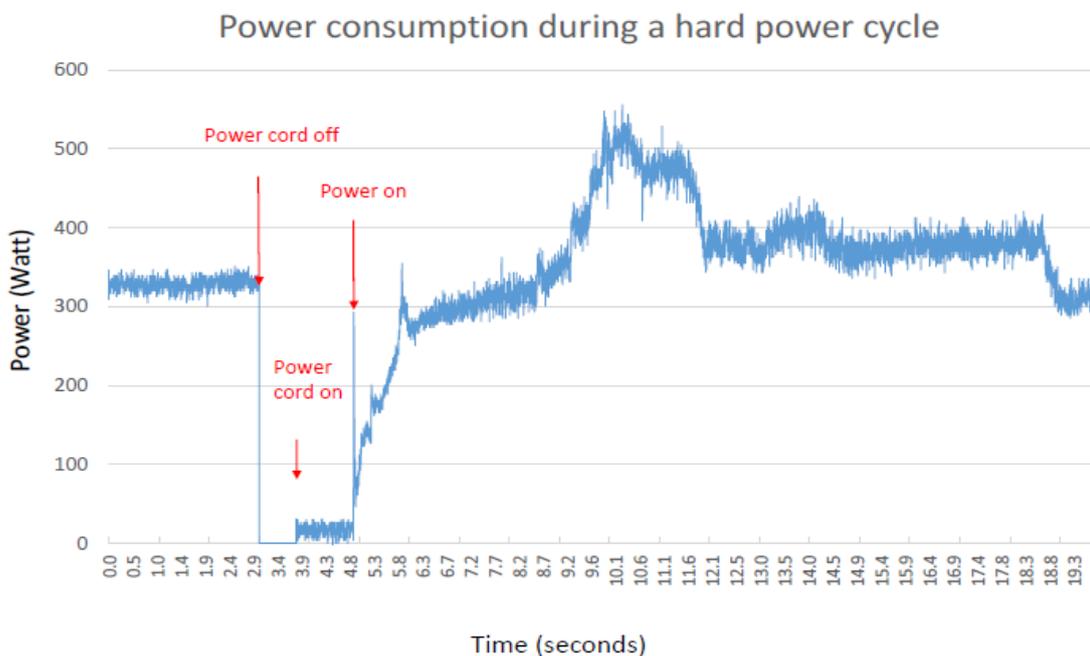


Figura 24. Variazioni di potenza dovuta a spegnimento e riaccensione del server

Altrimenti, se i cambi del carico sono prevedibili, il sistema di Celle a Combustibile può aumentare la produzione in tempi utili, ma questo meccanismo potrebbe comportare effetti negativi da un punto di vista dell'efficienza.

È molto interessante notare, come eventi imprevedibili, come il riavvio di un server, dovuto a un crash, non comporta variazioni significative di potenza, come mostrato nella figura 25. Questo perché i componenti elettrici sono ancora accesi nel processo di riavvio.

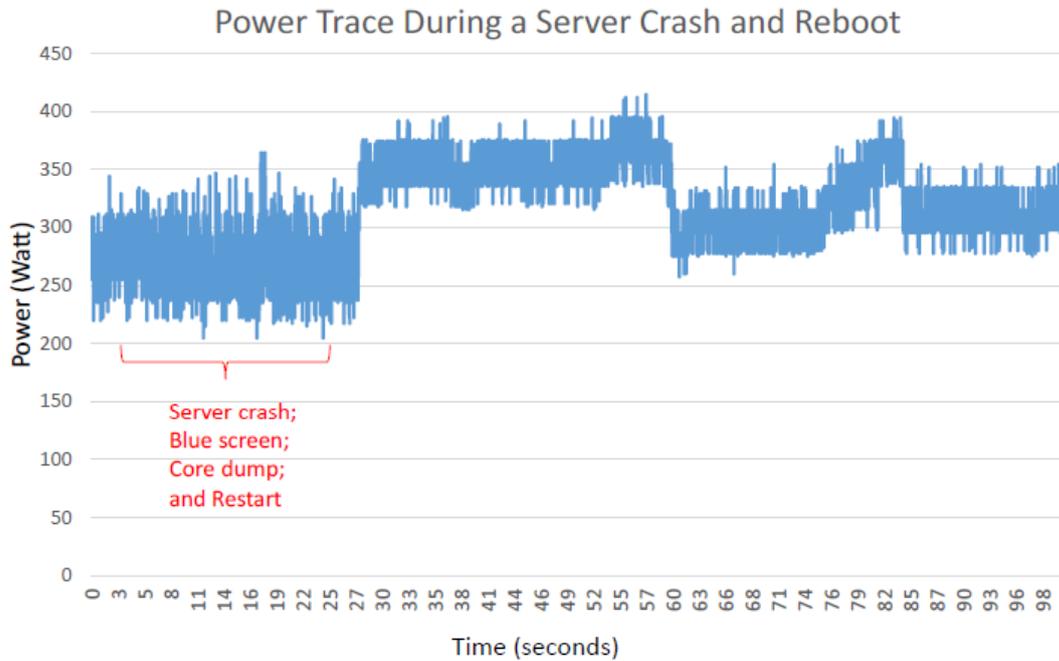


Figura 25. Andamento della potenza di un server dopo la sequenza di riavvio

#### 5.4.3 Modifiche del carico a lungo termine

Il carico del Data Center può presentare anche cambiamenti più a lungo termine, nel corso dei giorni e delle settimane. Questo tipo di variazioni però sono facilmente prevedibile e gestibili dal sistema di Fuel Cells.

## 6. Sistemi sperimentali FC-Data Centers

Diversi studi ed esperimenti con server reali, hanno dimostrato che le uniche cause di grosse variazioni di carico sono i processi di accensione e spegnimento, oltre che i riavvii dovuti a danni o manutenzione: la sfida per i sistemi di Fuel Cells è, quindi, nella gestione delle variazioni di carico a breve termine.

Un design conservativo può prevedere un sistema UPS che disaccoppi il sistema di Fuel Cells con il server, in modo da mantenere il design convenzionale. In alternativa è possibile fare affidamento sulle capacità del sistema di Celle per alimentare il server.

Uno di questi esperimenti è stato svolto dal National Fuel Cell Research Center University of California[6], con un sistema di PEMFC.

## 6.1 Setup sperimentale

L'analisi è stata condotta su un sistema ibrido, e sono state testate due configurazioni differenti: uno con uscita AC e l'altro con uscita DC. Gli schemi delle due configurazioni sono visibili nella figura 26.

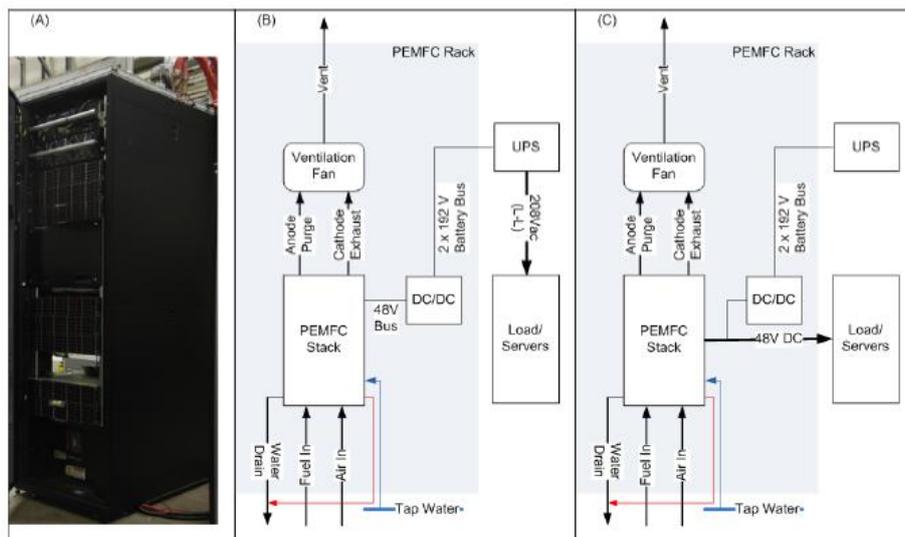


Figura 26. (A) Foto esterna del testbed, (B) configurazione AC, (C) configurazione DC.

Nel sistema con configurazione AC, la potenza prodotta di 10 kW viene convertita in 192 V in corrente continua (DC) e poi connessa all'UPS per rifornire il server di energia elettrica in corrente alternata (AC). Questa, tuttavia, non è la configurazione ottimale: nel sistema in corrente continua (DC) i server sono direttamente collegati al sistema PEMFC di 48 V.

## 6.2 Rendimento della Fuel Cell

La figura 27 mostra la tipica curva IV di una cella a combustibile, con le relative perdite nella regione di bassa corrente.

La tensione a circuito aperto (OCV, "Open circuit voltage") della singola cella è di 0.93 V.

La potenza massima raggiunta è di 10 kW, senza alcuna limitazione sulla corrente.

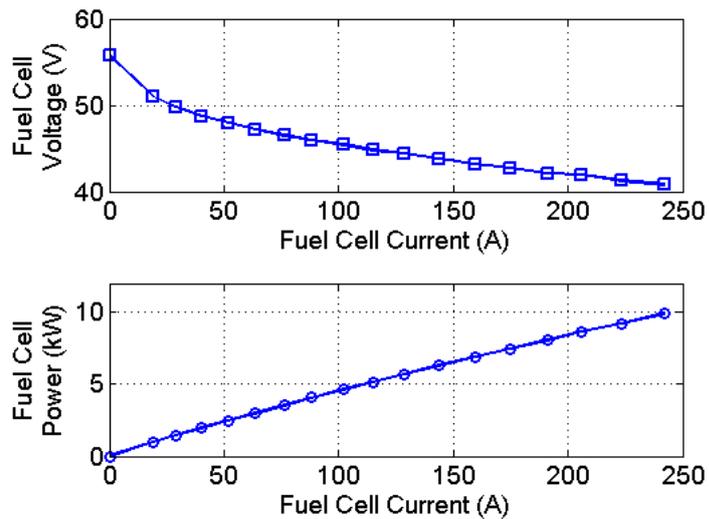


Figura 27. Curva di polarizzazione e curva di potenza

Operare a livelli di corrente elevati, il voltaggio di qualche cella potrebbe scendere al di sotto del valore medio per via di una disidratazione della membrana o l'esaurimento del combustibile[16].

Come mostrato in figura 28 il voltaggio della cella cresce con il valore della corrente e diventa relativamente stabile a 25mV. La portata d'aria mostrata in figura indica che il flusso è aggiustato stechiometricamente con la potenza in modo da fissare il rapporto tra reagenti e prodotto.

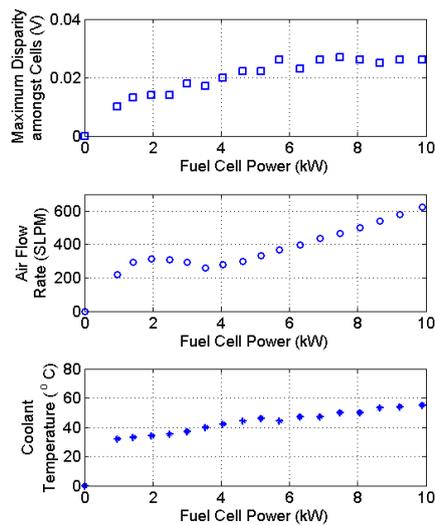


Figura 28. Proprietà del sistema di Fuel Cells

### 6.3 Rendimento del sistema FC

Per comprendere la capacità del sistema di seguire l'andamento del carico è stato applicato un carico con una richiesta di potenza con aumenti graduali, come mostrato nelle figure 29 e 30 (linea nera). Anche la produzione di potenza del sistema è stata misurata e inserita nelle figure.

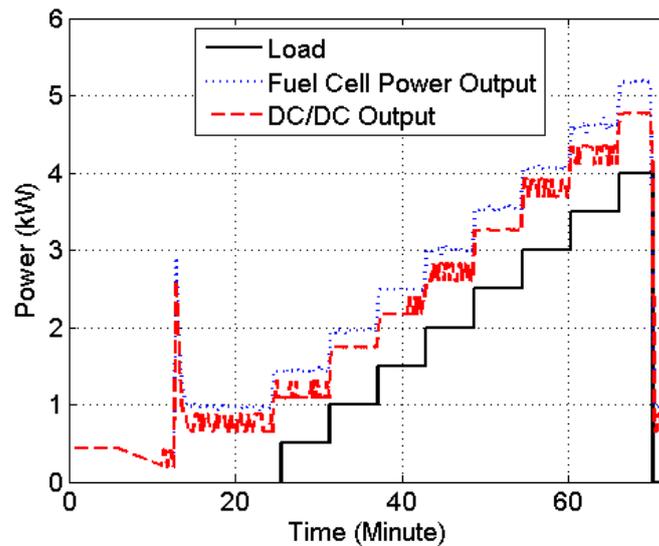


Figura 29. Risposta del sistema alle variazioni di potenza da 0 a 4.5 kW

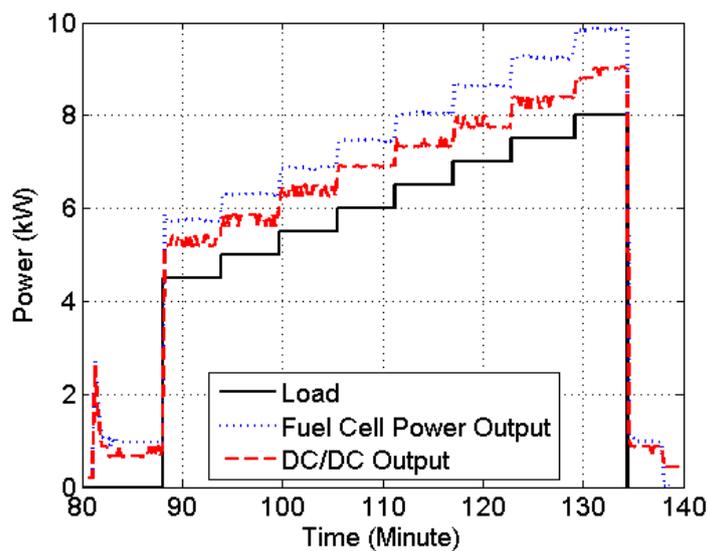


Figura 30. Risposta del sistema alle variazioni di potenza da 5 a 10 kW.

È possibile notare che il sistema risponde in maniera istantanea le variazioni di potenza.

In combinazione con il sistema UPS, il sistema di Celle a combustibile è in grado di soddisfare le variazioni del carico applicato.

La differenza tra l'output della cella e quello del convertitore è dovuta alle perdite all'interno del convertitore DC/DC: il 10,2% della potenza prodotta dalla cella a combustibile è consumata nel processo di conversione.

Ulteriori perdite sono dovute al sistema UPS, dove parte dell'energia è utilizzata per alimentare le batterie.

I test svolti per configurazione DC sono stati effettuati collegando il server direttamente alla PEMFC, come illustrato in figura 26 (C), e utilizza direttamente la corrente in uscita (DC).

In figura 31 è rappresentata la risposta, in termini di voltaggio, corrente e potenza, della cella alle variazioni del carico, in questa configurazione.

Senza l'ausilio di nessuna batteria il sistema PEMFC è in grado di seguire le variazioni di carico richieste.

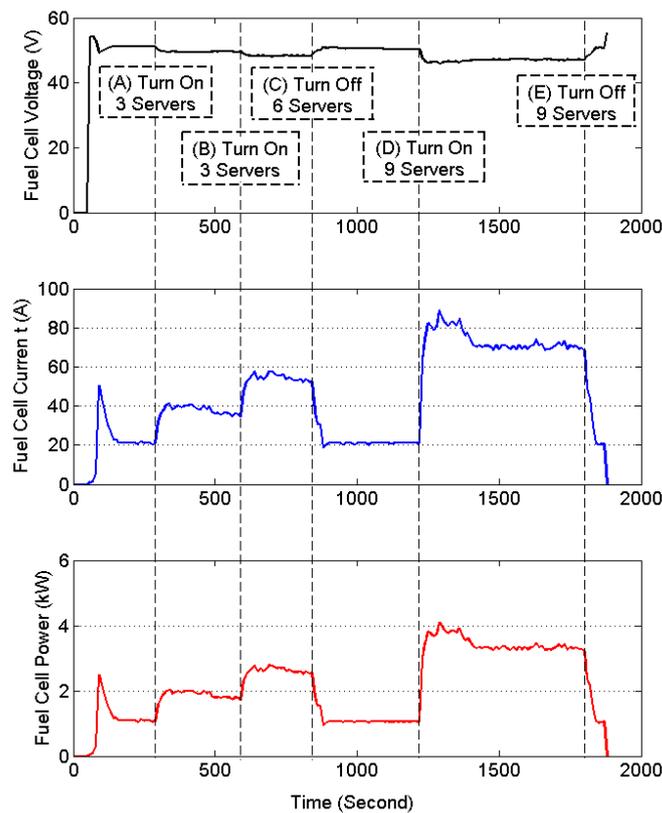


Figura 31. Risposte della Fuel Cell alle operazioni dinamiche dei servers

Vengono rappresentati 3 eventi:

- Evento A: accensione di 3 server;

- Evento B: accensione di altri 3 server;
- Evento D: accensione di 9 server;

Si nota che la velocità di reazione del sistema è, rispettivamente, di 52 W/s, 60 W/s e 192 W/s.

Osservando con maggiore attenzione i due eventi A e B, si nota, come mostrato in figura 32 che nel caso di accensione di 3 servers si verificano sottotensioni da 500 a 800 mV.

Nel caso di accensione di 9 servers, la sottotensione registrata è di 900 mV. In entrambi i casi, tuttavia, la tensione della cella ritorna in condizioni stazionarie di regime entro 12 secondi. La risposta dinamica delle celle può essere migliorata aumentando la quantità di aria nel catodo: un quantitativo maggiore di aria stechiometrica può causare delle sottotensioni minori e delle risposte più rapide in condizioni di carichi dinamici[17] [18].

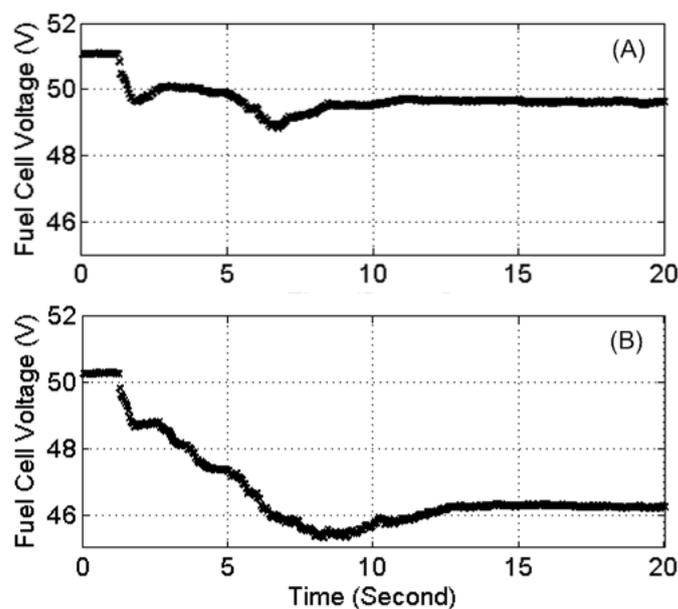


Figura 32. Transiente della Fuel Cell in risposta all'accensione di 3 servers (A) o di 9 servers (B)

L'efficienza del sistema è stata valutata in stato stazionario, con 9 servers funzionanti contemporaneamente, quando la portata di combustibile e di refrigerante in ingresso e uscita sono in equilibrio.

Come mostrato in figura 33, quando la potenza in uscita dalla cella a combustibile è di 3.3 kW, l'efficienza elettrica del sistema raggiunge il 58.3% (considerando il potere calorifico

inferiore dell'Idrogeno). Il 5.1% della potenza elettrica generata viene consumata nella BoP (Balance of Plant) del sistema a celle. Il 13.4% serve ad alimentare il sistema UPS (per alimentare le batterie) e il rimanente 39.8% va a rifornire il PSU (power supply unit) del server.

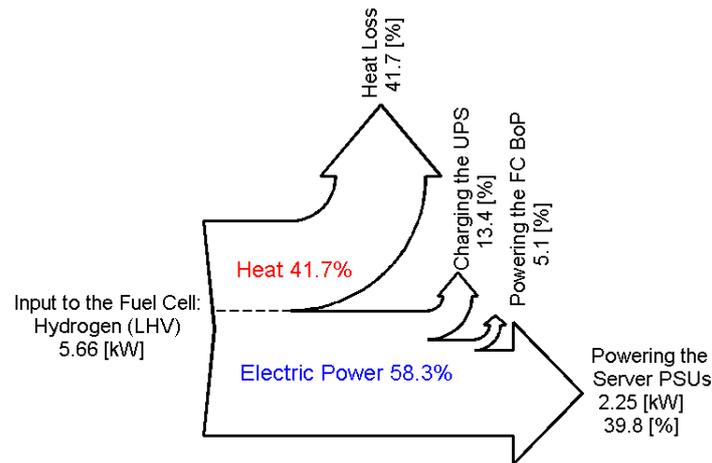


Figura 33. Diagramma di efficienza del sistema con UPS integrato (configurazione DC)

In questo caso il sistema UPS è alimentato dalle celle a combustibile, causando una diminuzione dell'efficienza del sistema; in un design ottimizzato, il l'UPS può essere disconnesso dal sistema. Come risultato, il 53% della potenza generata può essere distribuita al PSU, in condizioni operative, come mostrato in figura 34.

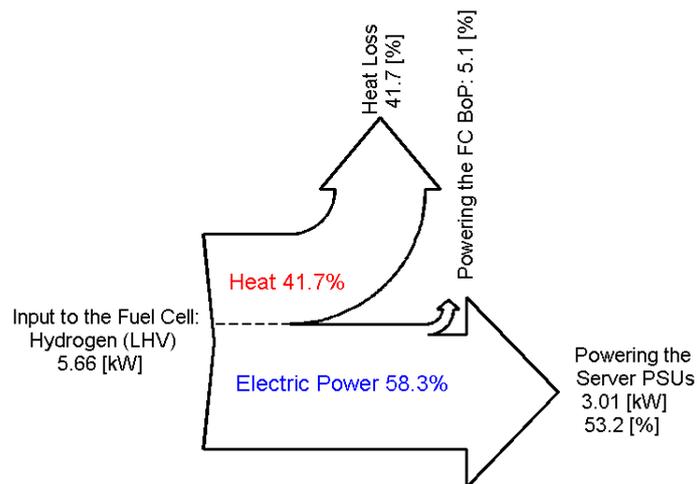


Figura 34. Diagramma di efficienza del sistema con UPS scollegato (configurazione DC)

## 6.4 Efficienza del Data Center

In un tradizionale data center, connesso alla rete elettrica, meno del 35% dell'energia fornita dalla centrale di produzione arriva effettivamente al DC, per via di perdite per trasmissione e distribuzione. Con il consumo associato al sistema di raffreddamento, illuminazione e batterie, solo il 17.5 % dell'energia distribuita dalla centrale, arriva al server. <sup>(2)</sup>

È stato effettuato un paragone tra un data center con un sistema di Fuel Cells, con le efficienze misurate nei paragrafi precedenti, e un sistema tradizionale (Figura 35).

È stato assunto un carico di raffreddamento proporzionale a quello elettrico per entrambi i sistemi. Come mostrato in figura, l'efficienza globale (fuel to server) del sistema con Fuel Cells raggiunge il 29.5% ed è significativamente più alta del 17.5% di un sistema tradizionale. È, inoltre, stato assunto che il calore prodotto dalle Fuel Cells non sia stato recuperato. Tuttavia, con una tecnologia combinata di raffreddamento, calore e potenza (CCHP) è possibile recuperare il calore creato dalle alte temperature della Cella, e fornire sufficiente raffreddamento dal server. In questo caso, la potenza distribuita al Data Center è significativamente più alta.

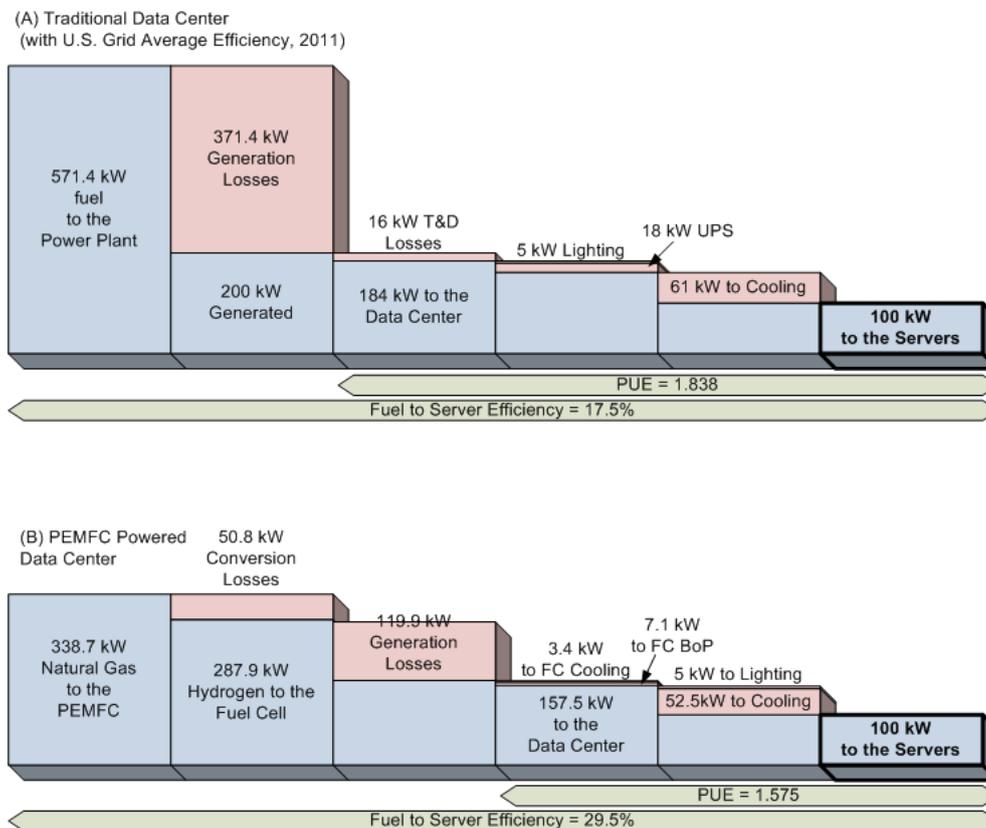


Figura 35. Perdite di un sistema tradizionale (A) e perdite di un sistema con FC integrate (B)

È stata svolta un'ulteriore analisi per comprendere l'effetto del sistema di Fuel Cells sul PUE.

In entrambi i sistemi della figura 17, è stata presa come assunzione che per ogni kW di carico elettrico, il sistema di raffreddamento consumi 0.5 kW (cooling ratio = 0.5).

Con sistemi di raffreddamento più efficienti, il consumo può essere minore, impattando sul valore del PUE. In figura 36 è possibile vedere l'andamento del PUE al variare del cooling ratio: in ogni caso, il sistema tradizionale ha sempre un valore di PUE più elevato del sistema con Fuel Cells, che raggiunge un PUE di 1.15 quando il cooling ratio ha un valore di 0.1.

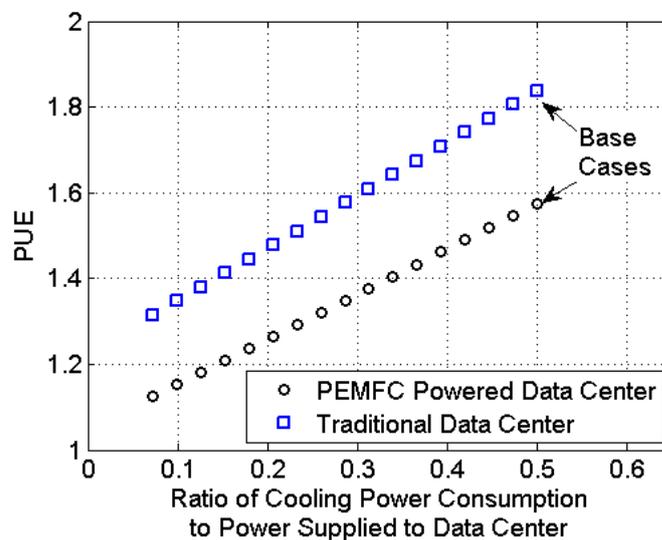


Figura 36. PUE del Data Center al variare del cooling ratio

Tutte le migliorie, che un sistema di celle a combustibile può apportare nel mondo dei Data Centers, da un punto di vista tecnologico, di sistema, di efficienza e di emissioni che sono state elencate nei paragrafi precedenti, sono ben riassunte in Figura 37, dove è effettuata una breve sintesi di tutte le differenze tra un sistema di alimentazione classico e un sistema di alimentazione di Fuel Cells.

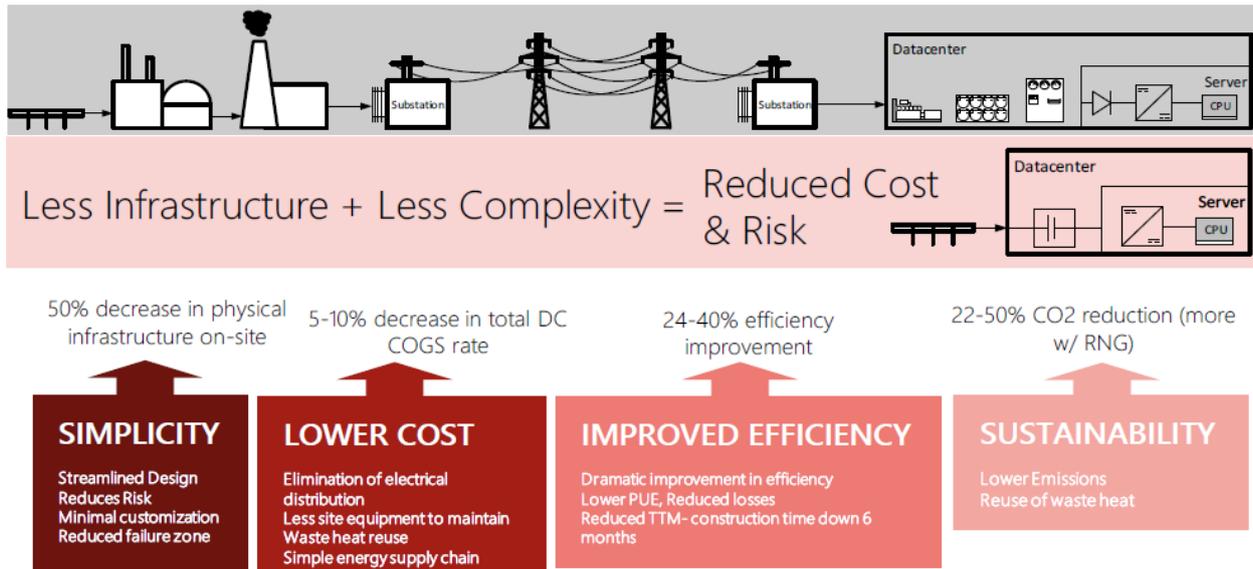


Figura 37. Vantaggi di un sistema Fuel Cells

## **7. Analisi economica**

Dopo un'analisi della fattibilità e della convenienza fisica dell'accoppiamento Data Center – Fuel Cells, è necessario passare ad un'analisi economica, partendo da quello che è lo stato dell'arte della tecnologia e proseguendo con un'analisi che tiene conto degli sviluppi tecnologici e dell'andamento dei costi della tecnologia in futuro.

La tecnologia scelta per quest'analisi è quella delle SOFC, migliori, allo stato attuale, per l'utilizzo in un Data Center per determinate caratteristiche come:

- Maggiore variabilità dal punto di vista del combustibile (non sono limitate al solo utilizzo dell'idrogeno che al giorno d'oggi non è semplice da reperire).
- Le SOFC sono affidabili ed efficienti in quasi tutte le taglie, e si adattano bene alla produzione in DC[3].
- Le SOFC hanno un'efficienza del 10-20% maggiore rispetto alle PEMFC, utilizzando un combustibile idrocarburico. Per via della loro abilità nell'utilizzare gas naturale come combustibile, le SOFCs sono un'ottima scelta anche per i data center che sono localizzati in zone remote.
- Le PEMFC utilizzano catalizzatori in platino molto costosi, mentre i materiali ceramici e i metalli non preziosi che costituiscono le SOFCs permettono di evitare spese eccessive.

### ***7.1 Data Center in Europa***

Prima di iniziare con l'analisi vera e propria è importante capire quanto e come i Data Centers sono diffusi in Europa, e soprattutto dividerli in base alla taglia, in modo da scegliere quello adatto per l'analisi.

Dato che le SOFC in vendita in EU hanno un range di taglia che va dai 12 ai 50 kW, è interessante capire quanto siano diffusi Data Center con taglie intorno ai 100 kW.

La tabella 7 mostra l'andamento della tecnologia dei Data Centers in Europa Occidentale dal 2013 a oggi.

<b>Western Europe</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>	<b>2020</b>
Net data centre space (thousands of m <sup>2</sup> )	102,056	10221	10,105	10,055	9,875	9,555	9,365	9,155
Average power density (kW/m <sup>2</sup> )	1.1	1.1	1.2	1.2	1.3	1.3	1.2	1.3
Total power usage (GW)	11.3	11.2	12.1	12	12.8	12.4	11.3	10.9

Source: Broadgroup 2014

*Tabella 7. Data Centers in Europa Occidentale*

È possibile notare che con delle tecnologie in continuo sviluppo, i metri quadri utilizzati scendono, mentre la densità di potenza va a crescere.

Analizzando questi dati, e incrociandoli con quelli della tabella 8, si nota come i cosiddetti “Server Rooms”, con una superficie minore di 100 m<sup>2</sup> sono i più adatti all’analisi, in quanto data una densità di potenza di 1.3 kW/m<sup>2</sup>, è possibile stimare una potenza richiesta di circa 130 kW[19].

<b>Data centres category</b>	<b>No of data centres (2013)</b>
Server Cabinets (3-10 m <sup>2</sup> )	30500
Server Rooms (11-100 m <sup>2</sup> )	18100
Small Data centres (101-500 m <sup>2</sup> )	2150
Medium Data centres (501-5000 m <sup>2</sup> )	280
Large Data centres (over 5000 m <sup>2</sup> )	70

Source: Hintemann and Clausen, 2014

*Tabella 8. Numero di Data Centers per taglia*

In modo tale da poter effettuare un’analisi, da un punto di vista economico, è necessario esser a conoscenza di una serie di indicatori e valori.

## 7.2 CAPEX E OPEX

Il CAPEX (Capital Expenditures) rappresenta i flussi di cassa in uscita per la realizzazione di investimenti in attività immobilizzate di natura operativa; si tratta, quindi, di investimenti in capitale fisso. Le spese in conto capitale sono sostenute per aumentare la capacità dell'azienda di creare ricchezza. Fra gli investimenti sostenuti sono compresi l'acquisto di macchinari, proprietà e attrezzature. Tutte queste attività si deprezzano con il tempo.

L'OPEX (Operating Expense) o spesa operativa è il costo necessario per gestire un prodotto, un business o un sistema. Tra le spese operative, le più importanti sono i costi di O&M (Operation and Maintenance), ovvero i costi operativi e di gestione.

Le spese in conto capitale comportano costi molto elevati, in quanto riguardano l'acquisto di beni fissi, solitamente costosi. Esse, tuttavia, sono sostenute una sola volta.

D'altro canto, le spese operative comportano costi ricorrenti, che sono sostenuti ripetutamente in maniera tale da assicurare che l'entità funzioni senza intoppi nel processo.

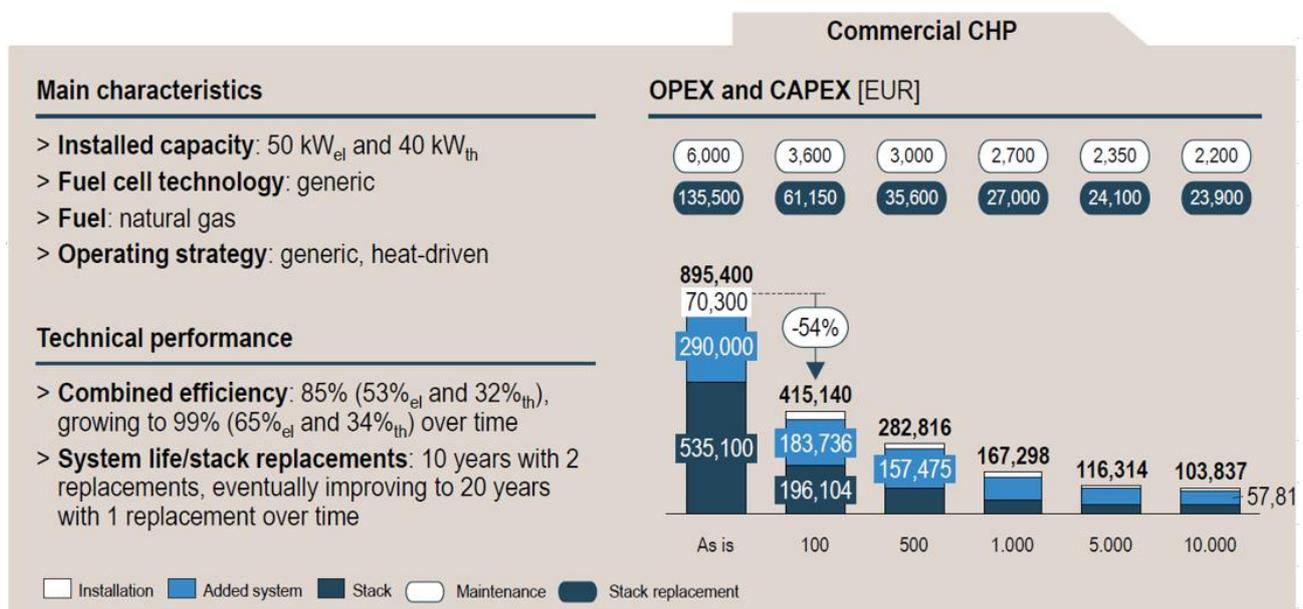


Figura 38. Costo della tecnologia di Fuel Cells commerciali

Come evidente dalla figura 38, il costo attuale della tecnologia è, al giorno d'oggi molto elevato. I costi così alti sono, principalmente, dovuti, a uno sviluppo della tecnologia ancora acerbo e ai grossi investimenti, degli ultimi anni, nel settore di ricerca e sviluppo.

Sicuramente migliore è la previsione futura, con una riduzione evidente dei costi, in particolare quando la tecnologia raggiungerà la sua "maturità".

Interessante notare, nella figura 38, la differenziazione tra i costi degli stack, dei sistemi ausiliari e dell'installazione che rientrano nel Capex, e i costi di manutenzione e sostituzione degli stack, che rientrano invece negli Opex.

### 7.3 NPV e PBT

NPV, PBT e Discount rate sono tre fattori fondamentali per sviluppare un'analisi economica di un qualsiasi investimento, ed in particolare una Cash-Flow analysis.

- NPV (Net Present Value o valore attuale netto): In economia rappresenta una metodologia tramite cui si definisce il valore attuale di una serie di flussi di cassa non solo sommandoli algebricamente, ma attualizzandoli sulla base del tasso di rendimento (costo opportunità dei mezzi propri). Il valore attuale netto originato da un investimento è calcolato dalla somma aritmetica del costo d'investimento (I) e dei flussi di cassa ( $B_t$ ), durante l'intera vita del progetto, scontati con un certo fattore (i):

$$NPV = -I + \frac{B_1}{(1+i)} + \frac{B_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{B_n}{(1+i)^n} = -I + \sum_{t=1}^n \frac{B_t}{(1+i)^t}$$

*Equazione 3. Net Present Value*

- PBT (Pay Back Time): Il PBT indica il periodo di recupero del capitale investito e misura, quindi, il tempo in cui i flussi di cassa negativi eguagliano quelli positivi.

$$-I + \sum_{t=1}^{\tau} \frac{B_t}{(1+i)^t} = 0$$

*Equazione 4. Pay Back Time*

## ***7.4 Analisi dei flussi di cassa***

La Cash-Flow è un'analisi dei flussi di cassa che consente di valutare la fattibilità economica del progetto, valutando l'andamento dei flussi anno dopo anno, mettendo in relazione spese e profitti. Partendo da quello che è definito anno 0, in cui l'unico costo è quello dell'investimento iniziale, si valutano anno dopo anno i flussi di cassa per valutare il tempo di ritorno dell'investimento (PBT).

In questo caso le analisi svolte sono due. Nello specifico, una è stata effettuata con un limite a breve termine, prendendo in considerazione lo stato attuale della tecnologia e dei costi ad essa connessi, mentre l'altra è basata sulle previsioni sull'andamento dei costi con il progredire del tempo e con una tecnologia che si avvia verso la "maturità" (Figura 37.)

Prima di proseguire, è però necessario dimensionare il sistema, calcolarne i consumi e valutare l'eventuale quota di energia che non è in grado di produrre e per la quale è necessario far ricorso alla rete di distribuzione.

Basandosi su dati medi disponibile nel mercato europeo, si possono valutare le caratteristiche delle SOFC, sulla base delle quali effettuare l'analisi.

Come detto nel paragrafo 7.1, l'analisi sarà effettuata su un Data Center con una taglia da 130 kW.

Le SOFC attualmente in commercio in Europa, hanno taglie medie di 25 kW di potenza elettrica, ovvero quella richiesta dai Data Center, con efficienze elettriche del 55% e termiche del 27%.

Per coprire il fabbisogno di 130 kWe, è stato preso in considerazione un sistema di 6 SOFC, per una potenza totale installata di 150 kWe.

Come detto, tuttavia, i Data Center hanno dei consumi costanti nel corso dell'anno per quanto riguarda l'apparecchiatura IT, mentre il sistema di raffreddamento ha dei consumi che variano principalmente con la temperatura esterna, e quindi con le stagioni: maggiore la temperatura esterna, maggiore sarà la richiesta del sistema di cooling per mantenere stabile la temperatura interna del Data Center.

#### 7.4.1 Consumi di gas naturale e produzione di energia elettrica

Come anticipato nel paragrafo 7.1, l'analisi si basa su un Data Center con una taglia di 130 kW, basandosi sui dati delle Tabelle 7 e 8.

Calcolando i consumi annuali globali (incluso il consumo del sistema di raffreddamento) di un Data Center con una taglia di 130 kW è possibile stimare la quota di energia elettrica che il sistema SOFC riesce a fornire al DC, e quella che deve comunque essere acquistata dalla rete di distribuzione.

Nella figura 38, la superficie in blu rappresenta la parte di carico che il sistema SOFC copre con la sua produzione, pari a 3,600 kWh al giorno. È stato, infatti considerato un funzionamento del sistema di 8,760 ore annue, poiché trattandosi di un Data Center deve raggiungere livelli di disponibilità elevatissimi, prossimi a 1.

La parte in rosso, è il carico extra, dovuto al sistema di raffreddamento, che come detto è maggiore nei mesi più caldi.

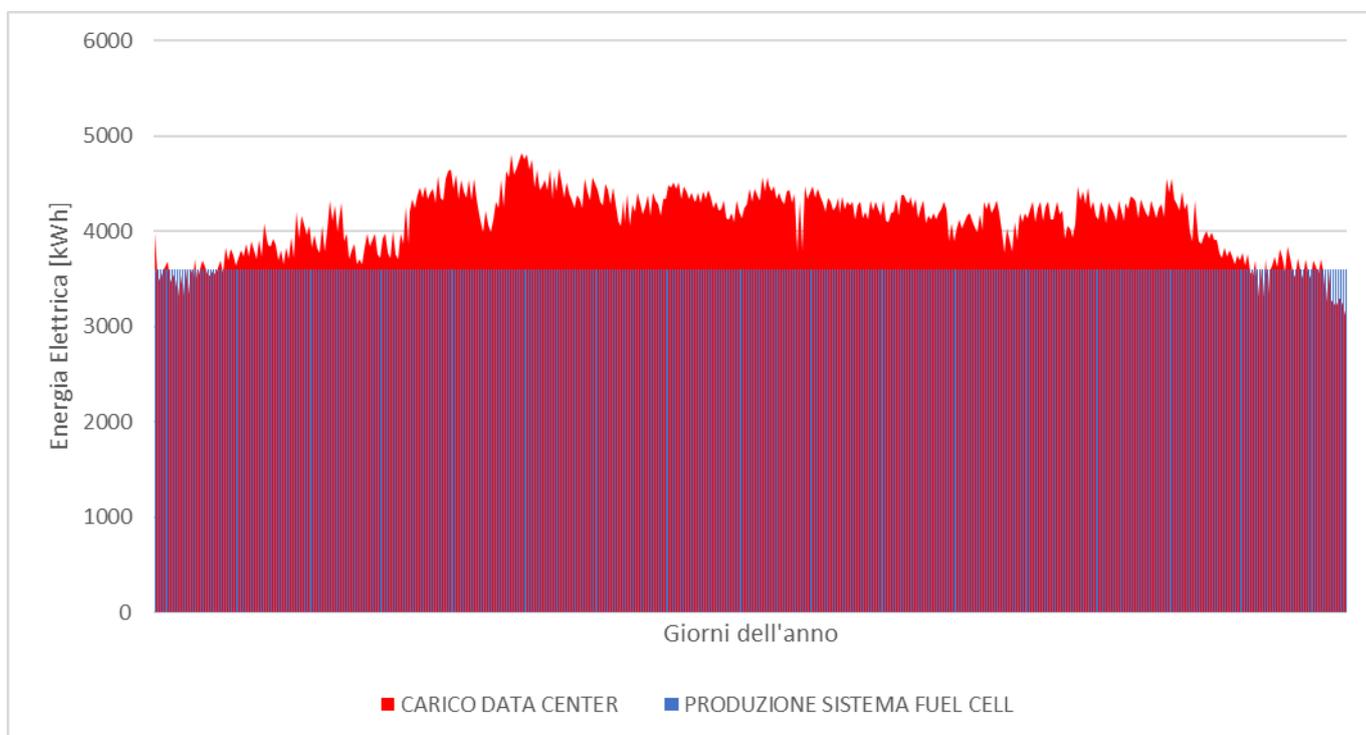


Figura 39. Carichi annui

È stata calcolata una richiesta di energia che il sistema SOFC non riesce a coprire di 226,470.4 kWh, che con un costo dell'energia elettrica di 170 €/MWh[20], richiede una spesa annua di circa 38,545.80 €.

Considerando gli stessi costi è, tuttavia, importante evidenziare il risparmio annuo sull'energia elettrica che è di 223,380.00 €, dovuto al sistema SOFC.

Altro costo da prendere in considerazione per l'analisi è quello del gas naturale, da utilizzare come combustibile per le SOFC. Per una potenza di 150 kW e un funzionamento di 8760 ore annue, il sistema SOFC produce 1.314.000 kWh.

L'efficienza delle SOFC nell'attuale mercato europeo si aggira intorno al 60%: è dunque calcolabile un consumo di gas naturale di 2,190,000 kWh e di una spesa annua di 87,600 € (il prezzo del gas naturale è pari a 0.04 €/kWh[20]).

#### *7.4.2 Analisi a breve termine*

L'analisi a breve termine si basa sulle caratteristiche attuali del mercato europeo delle SOFC.

Dopo un'analisi dei costi di diverse aziende produttrici è stato possibile ottenere un costo medio per stack e sistemi ausiliari: il costo medio attuale è di 11,880.00 kWe, al quale va aggiunto il 20% come margine aziendale e 2,500 € per l'installazione.

È stato, dunque, possibile calcolare il Capex dell'investimento pari a 1,784,500.00 €.

Per quanto riguarda i costi operativi, oltre ai consumi di gas ed energia elettrica, bisogna prendere in considerazione la manutenzione e la sostituzione degli stack.

Mentre per la manutenzione è stato calcolato un costo annuo di circa 10,200.00 €, la sostituzione degli stack necessita di maggiore attenzione.

Allo stato attuale della tecnologia, la vita di uno stack può essere stimata, con buona approssimazione, a 43,000 ore, ovvero 5 anni.

Come facile intuire, anche il costo della sostituzione degli stack è, al giorno d'oggi, molto elevato ed è pari, infatti, a 2,710 €/kWe: nel nostro caso, quindi, è pari a 406,500 €.

La somma di tutte le spese operative, va a sottrarsi, anno per anno, all'unico guadagno che il sistema SOFC produce a livello di costi, ovvero il risparmio dovuto all'energia elettrica prodotta internamente al sistema che non deve, quindi, essere acquistata dalla rete. Produzione e risparmi sono stati calcolati precedentemente.

ANNO	SOSTITUZIONE	COSTO SOSTITUZIONE	Manutenzione	CAPEX	Costo combustibile	Energia elettrica dalla rete	Costo annuo	Guadagni annui	Cashflow	Discount	Discounted cashflow	Cumulated cashflow
0	NO	0		-1,784,500			-1,784,500		-1,784,500	1.00	-1,784,500	-1,784,500 €
1	NO	0	-10,200		-87,600	-38,546	-136,346	223,380	87,034	0.97	84,091	-1,700,409 €
2	NO	0	-10,200		-87,600	-38,546	-136,346	223,380	87,034	0.93	81,247	-1,619,162 €
3	NO	0	-10,200		-87,600	-38,546	-136,346	223,380	87,034	0.90	78,500	-1,540,662 €
4	NO	0	-10,200		-87,600	-38,546	-136,346	223,380	87,034	0.87	75,845	-1,464,816 €
5	SI	-406,500	-10,200		-87,600	-38,546	-542,846	223,380	-319,466	0.84	-268,982	-1,733,798 €
6	NO	0	-10,200		-87,600	-38,546	-136,346	223,380	87,034	0.81	70,802	-1,662,996 €
7	NO	0	-10,200		-87,600	-38,546	-136,346	223,380	87,034	0.79	68,408	-1,594,588 €
8	NO	0	-10,200		-87,600	-38,546	-136,346	223,380	87,034	0.76	66,095	-1,528,493 €
9	NO	0	-10,200		-87,600	-38,546	-136,346	223,380	87,034	0.73	63,860	-1,464,633 €
10	SI	-406,500	-10,200		-87,600	-38,546	-542,846	223,380	-319,466	0.71	-226,475	-1,691,108 €
11	NO	0	-10,200		-87,600	-38,546	-136,346	223,380	87,034	0.68	59,614	-1,631,495 €
12	NO	0	-10,200		-87,600	-38,546	-136,346	223,380	87,034	0.66	57,598	-1,573,897 €
13	NO	0	-10,200		-87,600	-38,546	-136,346	223,380	87,034	0.64	55,650	-1,518,247 €
14	NO	0	-10,200		-87,600	-38,546	-136,346	223,380	87,034	0.62	53,768	-1,464,479 €
15	SI	-406,500	-10,200		-87,600	-38,546	-542,846	223,380	-319,466	0.60	-190,686	-1,655,165 €
16	NO	0	-10,200		-87,600	-38,546	-136,346	223,380	87,034	0.58	50,193	-1,604,972 €
17	NO	0	-10,200		-87,600	-38,546	-136,346	223,380	87,034	0.56	48,496	-1,556,476 €
18	NO	0	-10,200		-87,600	-38,546	-136,346	223,380	87,034	0.54	46,856	-1,509,620 €
19	NO	0	-10,200		-87,600	-38,546	-136,346	223,380	87,034	0.52	45,271	-1,464,349 €
20	SI	-406,500	-10,200		-87,600	-38,546	-542,846	223,380	-319,466	0.50	-160,553	-1,624,902 €

Tabella 9. Cash-flow e NPV – Analisi a breve termine

Nella tabella 9 sono riportati i flussi di cassa relativi ai vent'anni successivi all'investimento iniziale. Appare evidente, come, dopo 20 anni l'NPV rimane negativo: gli elevati costi di investimento e di sostituzione delle stack, uniti ad un'elevata frequenza della sostituzione stessa rendono l'operazione insostenibile da un punto di vista economico.

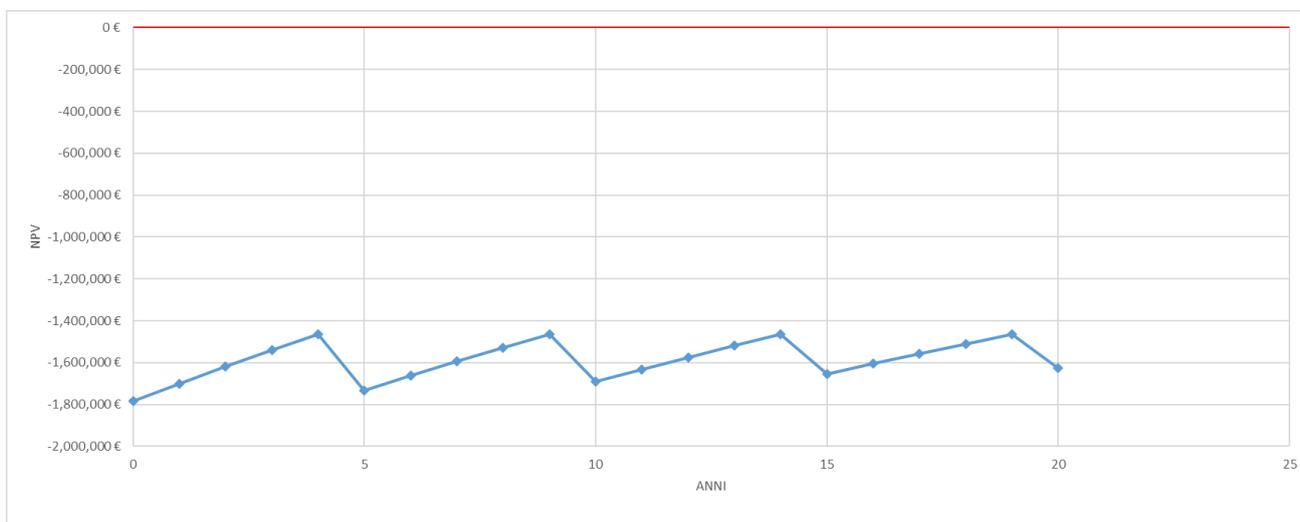


Figura 40. NPV – Analisi a breve termine

In figura 40 i precedenti dati sono inseriti in grafico ed è possibile notare come l'andamento sia in leggera crescita, ma ogni volta che avviene la sostituzione dello stack, la curva ritorni quasi completamente al livello di partenza. In questo modo non è possibile, di fatto, calcolare il Pay Back Time.

Il peso della sostituzione degli stack sui flussi di cassa appare evidente in Figura 41, dove sono rappresentate le componenti dell'Opex.

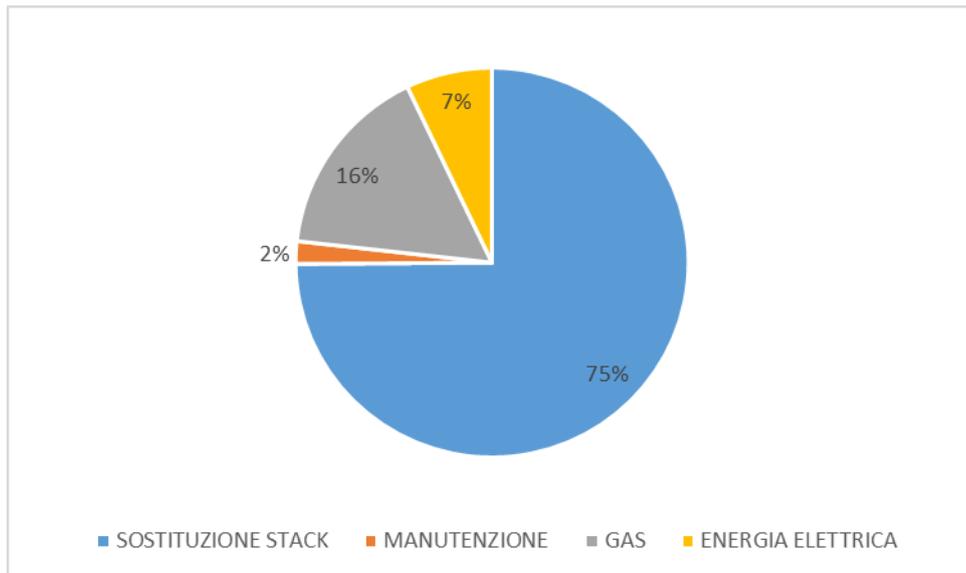


Figura 41. Suddivisione percentuale dei costi operativi – Caso a breve termine

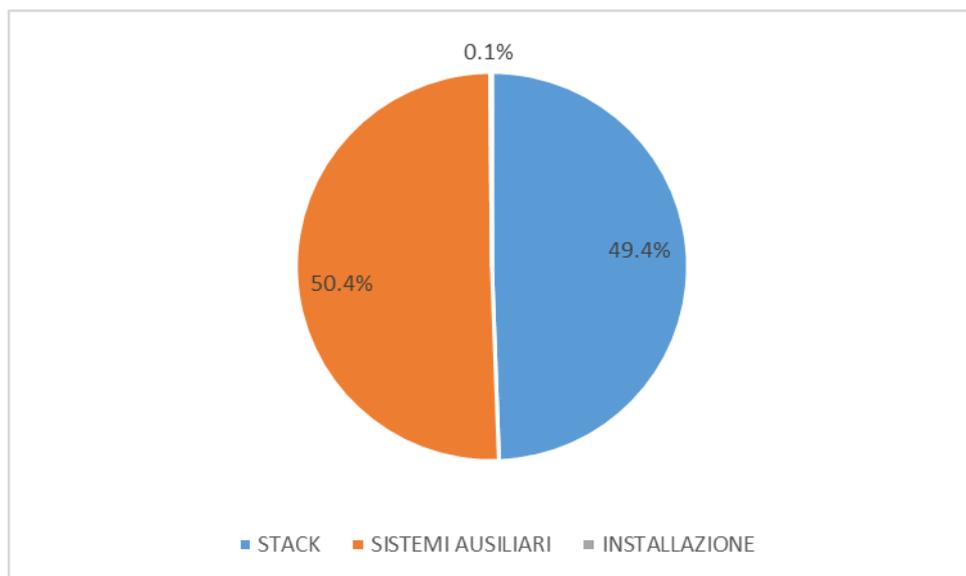


Figura 42. Suddivisione percentuale dei costi d'investimento – Caso a breve termine

La Figura 42, invece mostra la suddivisione del Capex, dove hanno un peso uguale il costo degli stack e dei sistemi ausiliari. Dati i costi molto elevati, il peso percentuale dell'installazione è prossimo a 0.

La Figura 43 mostra, infatti, che per ottenere un PBT inferiore ai 100 anni, il CAPEX deve scendere al di sotto dei 9,000 €/kW ed essendo l'analisi basata su dei costi d'investimento superiori a 11,000 €/kW, viene ribadita l'insostenibilità economica allo stato attuale.

La Figura 41 mostra, inoltre, l'andamento del PBT al variare del CAPEX, basandosi su un calo dei costi, dovuti a uno sviluppo della tecnologia, previsto nei prossimi anni.

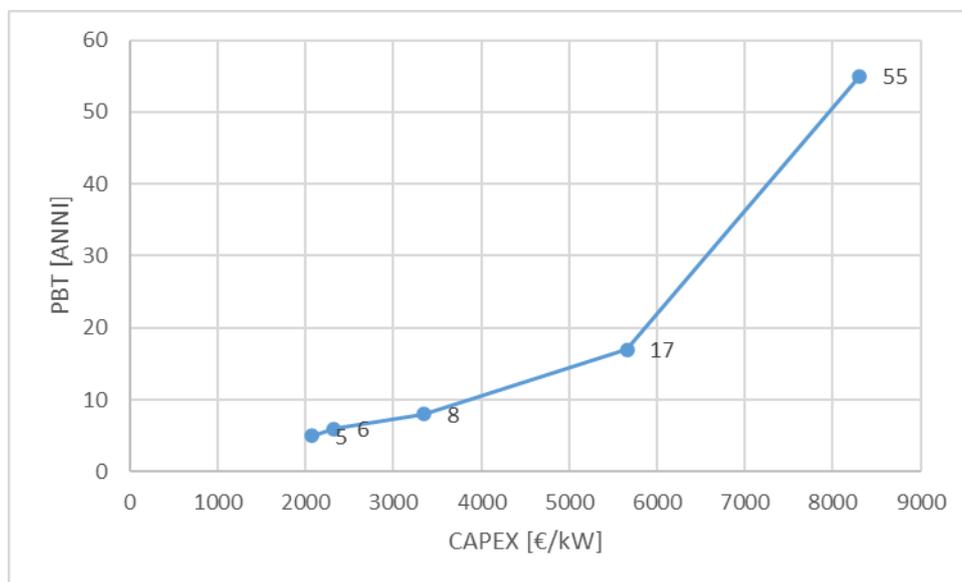


Figura 43. CAPEX vs PBT

Risulta evidente, come, per raggiungere livelli di competitività, il CAPEX deve scendere al di sotto dei 5,000 €/kW. Naturalmente, nell'analisi è stata considerata anche una diminuzione del prezzo della sostituzione delle stack, previsto dalla Figura 38, mentre i costi di gas, energia elettrica e manutenzione sono stati considerati costanti.

### 7.4.3 Analisi a lungo termine

Come evidenziato alla fine del precedente paragrafo, i costi attuali non rendono la tecnologia delle SOFC, competitiva a livello attuale. È necessaria, quindi, un'analisi a lungo termine che utilizzi dei, cosiddetti, costi target (obiettivo), molto più bassi di quelli attuali, e che tengono in considerazione lo sviluppo e la maturità della tecnologia: I costi target, medi, nel mercato europeo, sono uguali a 3,240.00 €/kW per l'investimento iniziale e di 540 €/kW per la sostituzione degli stack.

Nella presente analisi, quindi, il CAPEX iniziale sarà pari a 488,500.00 €, gli OPEX per gas ed energia elettrica rimangono uguali (considerando costanti i costi di acquisto), mentre variano il prezzo della sostituzione degli stack, ora pari a 81,000 €, e quello della manutenzione, stimato a 8,000 €.

Come nel caso precedente, è stata effettuata un'analisi sui flussi di cassa, della quale tutti i dati sono riassunti nella Tabella 10.

ANNO	SOSTITUZIONE	COSTO SOSTITUZIONE	Manutenzione	CAPEX	Costo combustibile	Energia elettrica dalla rete	Costo annuo	Guadagni annui	Cashflow	Discount	Discounted cashflow	Cumulated cashflow
0	NO	0		-488,500			-488,500		-488,500	1.00	-488,500	-488,500 €
1	NO	0	-8,000		-87,600	-38,546	-134,146	223,380	89,234	0.97	86,217	-402,283 €
2	NO	0	-8,000		-87,600	-38,546	-134,146	223,380	89,234	0.93	83,301	-318,982 €
3	NO	0	-8,000		-87,600	-38,546	-134,146	223,380	89,234	0.90	80,484	-238,498 €
4	NO	0	-8,000		-87,600	-38,546	-134,146	223,380	89,234	0.87	77,762	-160,736 €
5	NO	0	-8,000		-87,600	-38,546	-134,146	223,380	89,234	0.84	75,133	-85,603 €
6	NO	0	-8,000		-87,600	-38,546	-134,146	223,380	89,234	0.81	72,592	-13,011 €
7	NO	0	-8,000		-87,600	-38,546	-134,146	223,380	89,234	0.79	70,137	57,126 €
8	NO	0	-8,000		-87,600	-38,546	-134,146	223,380	89,234	0.76	67,765	124,892 €
9	SI	0	-8,000		-87,600	-38,546	-134,146	223,380	89,234	0.73	65,474	190,366 €
10	NO	-81,000	-8,000		-87,600	-38,546	-215,146	223,380	8,234	0.71	5,837	196,203 €
11	NO	0	-8,000		-87,600	-38,546	-134,146	223,380	89,234	0.68	61,121	257,324 €
12	NO	0	-8,000		-87,600	-38,546	-134,146	223,380	89,234	0.66	59,054	316,377 €
13	NO	0	-8,000		-87,600	-38,546	-134,146	223,380	89,234	0.64	57,057	373,434 €
14	NO	0	-8,000		-87,600	-38,546	-134,146	223,380	89,234	0.62	55,127	428,561 €
15	NO	0	-8,000		-87,600	-38,546	-134,146	223,380	89,234	0.60	53,263	481,825 €
16	NO	0	-8,000		-87,600	-38,546	-134,146	223,380	89,234	0.58	51,462	533,286 €
17	NO	0	-8,000		-87,600	-38,546	-134,146	223,380	89,234	0.56	49,722	583,008 €
18	NO	0	-8,000		-87,600	-38,546	-134,146	223,380	89,234	0.54	48,040	631,048 €
19	SI	0	-8,000		-87,600	-38,546	-134,146	223,380	89,234	0.52	46,416	677,464 €
20	NO	-81,000	-8,000		-87,600	-38,546	-215,146	223,380	8,234	0.50	4,138	681,602 €

Tabella 10. Cash-Flow e NPV – Analisi a lungo termine

Come previsto, analizzando la Figura 43, il PBT in questo caso, si abbassa a circa 7 anni, a dimostrazione del fatto che, una volta raggiunta la maturità da un punto di vista tecnologico, le SOFC possono diventare un'alternativa più che valida nel settore Data Centers e non solo. Da notare, che, oltre a una riduzione notevole dei costi d'investimento e

dei costi operativi, lo sviluppo tecnologico, porterebbe a una necessità di sostituire gli stack una volta ogni 10 anni, e non più ogni 5, favorendo ulteriormente l'NPV.

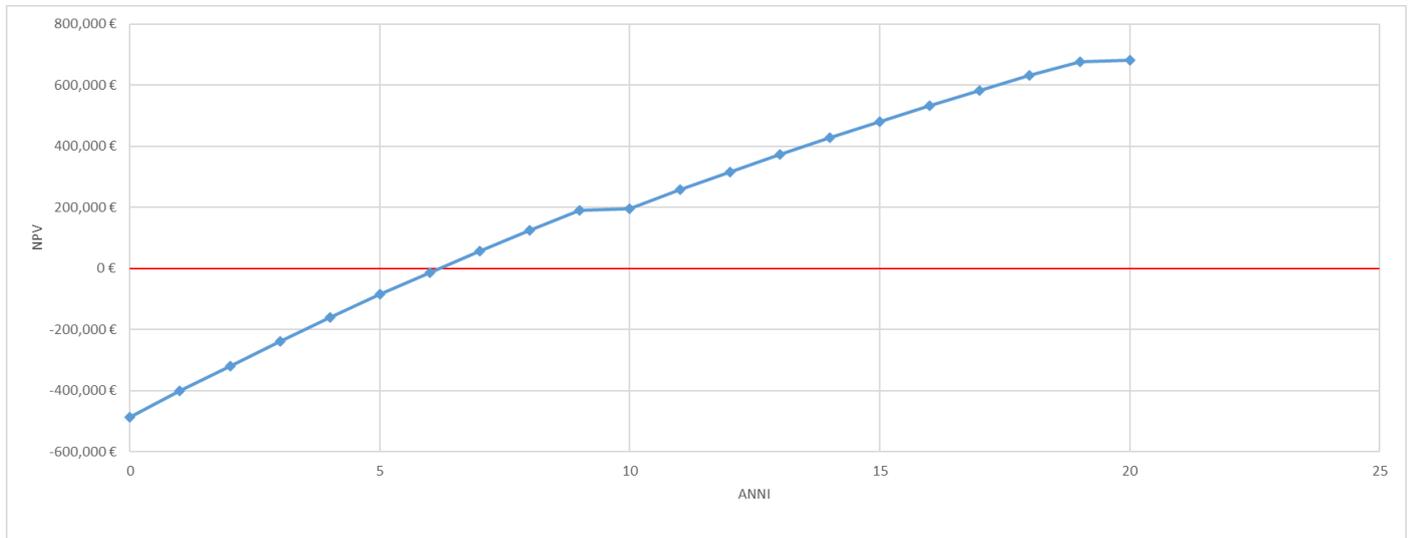


Figura 44. NPV analisi a lungo termine.

Il tutto è ben evidenziato nella Figura 44, dove risulta evidente l'andamento sempre crescente dell' NPV.

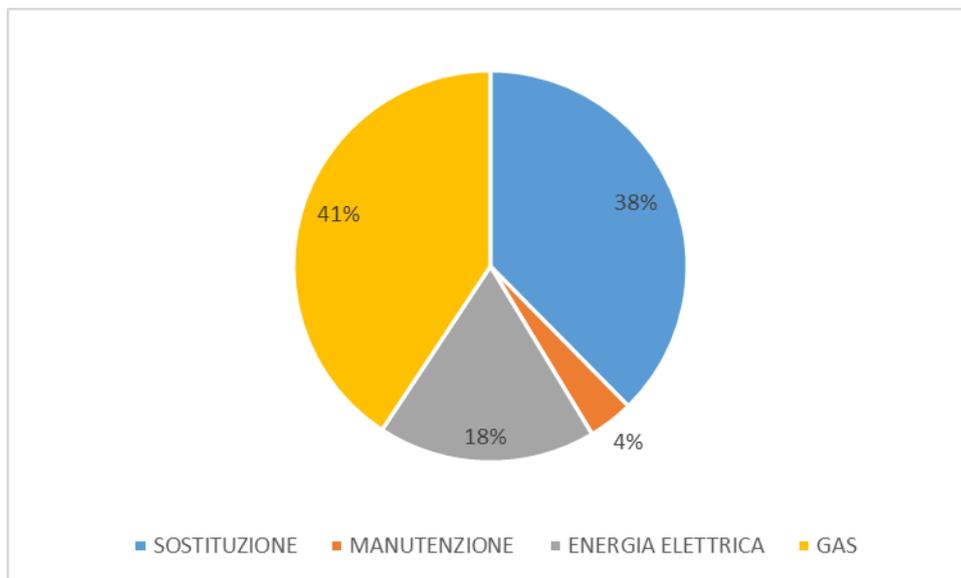


Figura 45. Suddivisione percentuale dei costi operativi – Caso a lungo termine

Analizzando la Figura 45 risulta evidente come, rispetto al caso precedente, la sostituzione assume un'importanza percentuale minore, a discapito delle altre componenti dell'OPEX, il che conferma la previsione di figura 38.

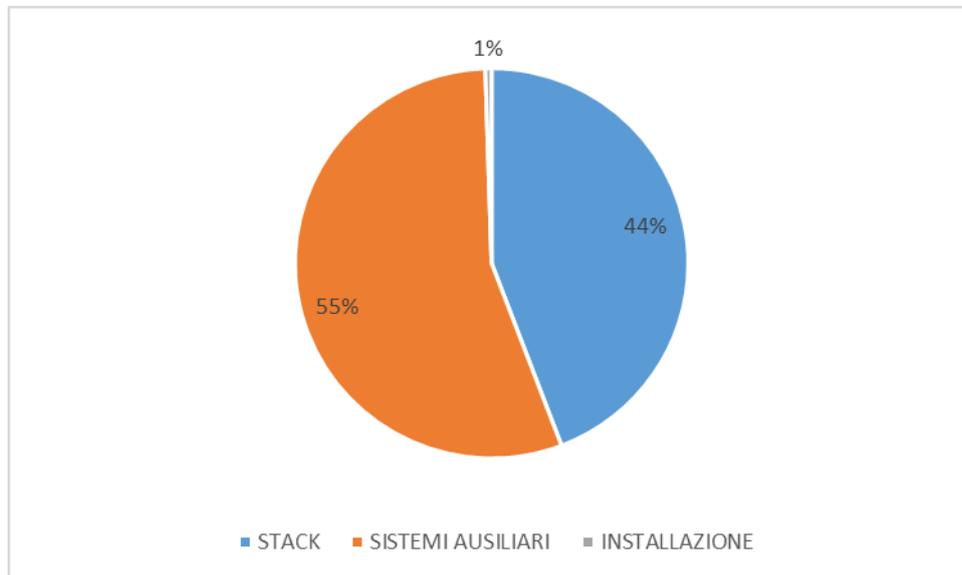


Figura 46. Suddivisione percentuale dei costi d'investimento – Caso a lungo termine

A livello di Capex (Figura 46), invece, i pesi percentuali rimangono pressochè costanti, in quanto a una riduzione del costo degli stack, corrisponde anche una diminuzione del costo dei sistemi ausiliari.

A questo punto, risulta interessante affrontare un ulteriore argomento che riguarda l'utilizzo delle SOFC, e delle celle a combustibile in generale, ovvero la produzione di calore.

Le SOFC, infatti, contemporaneamente alla produzione di energia elettrica, hanno una produzione di energia termica (calore), che se non è utilizzata viene dispersa nell'ambiente, ma che può rappresentare un valore aggiunto sia a livello economico che a livello di impatto ambientale.

Il sistema in esame, con una potenza nominale di 150 kW, lavorando alla massima potenza per 8760 ore annue, è in grado di produrre una quantità di energia termica di 645,054.55 kWh, data un'efficienza termica del 27%.

Partendo dall'analisi a lungo termine, è stato immaginato di cedere il calore prodotto dall'impianto ad una rete di teleriscaldamento, considerando un costo di 0.0620073 €/kWh[21], ovvero il costo dell'energia termica della rete di teleriscaldamento della città di Torino per uso domestico, è stato calcolato un guadagno annuo di 39,998.09 €.

Il contributo della cessione del calore abbassa ulteriormente il valore del PBT da 7 a 5 anni, come visibile in Figura 47, dove viene presentato il confronto con il caso precedente.

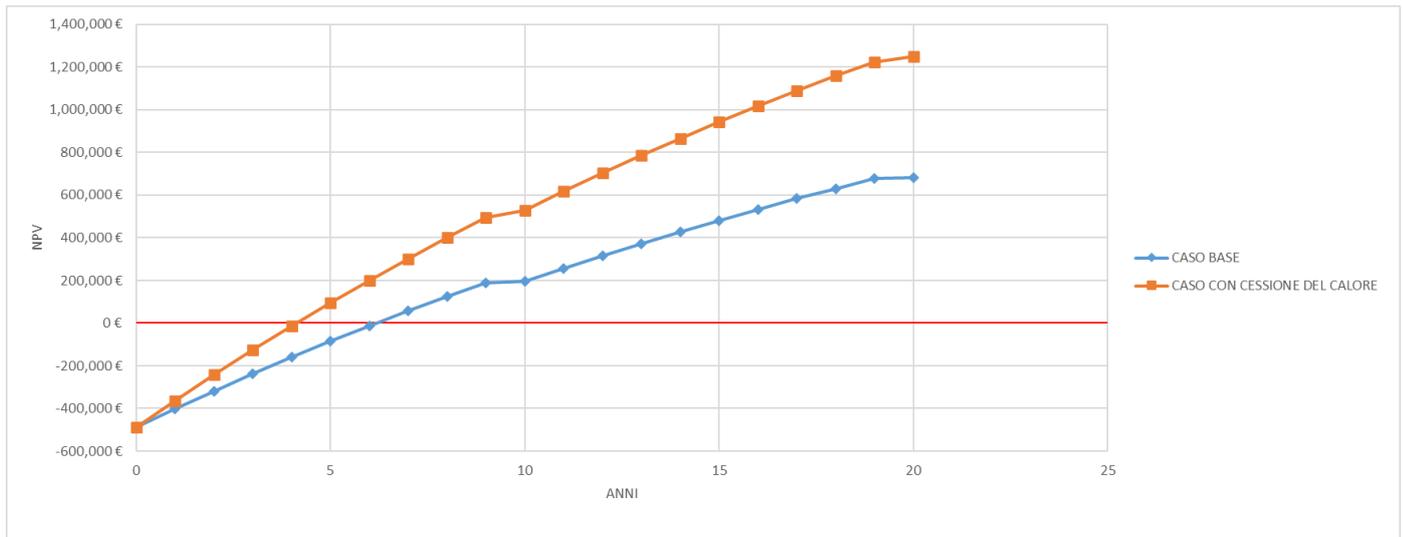


Figura 47. Confronto tra NPV target con e senza valorizzazione del calore prodotto.

La valorizzazione dell'energia termica prodotta dal sistema SOFC, ha quindi un duplice obiettivo: rendere l'investimento ancora più sostenibile dal punto di vista economico, ma anche quello di abbattere ulteriormente le emissioni, in quanto verrebbe prodotto del calore senza emissione alcuna.

## 7.5 Variazione dei costi di gas ed energia elettrica

Nel condurre previsioni a medio-lungo termine, è importante prevedere le possibili variazioni dei costi di gas ed Energia elettrica, e come questi incidono sull'investimento.

Mentre nell'analisi a breve termine, i costi di installazione e manutenzione del sistema hanno una prevalenza percentuale evidente, in un'analisi a lungo termine, i costi di gas ed energia elettrica, hanno dei pesi specifici su NPV e PBT più importanti.

Nel caso a breve termine, per ottenere un PBT minore di 100 anni, bisognerebbe avere un prezzo dell'energia elettrica superiore ai 250 €/MWh o un prezzo del gas naturale quasi nullo, che sono costi estremizzati per la situazione attuale e non renderebbero comunque il progetto appetibile da un punto di vista economico.

### 7.5.1 Gas naturale

Qualche ragionamento in più può essere effettuato con l'analisi a lungo termine. A questo proposito, è stato studiato come e quanto i costi di Gas ed energia elettrica influenzano il PBT, facendoli variare in maniera alternata e mantenendo costanti tutti gli altri costi.

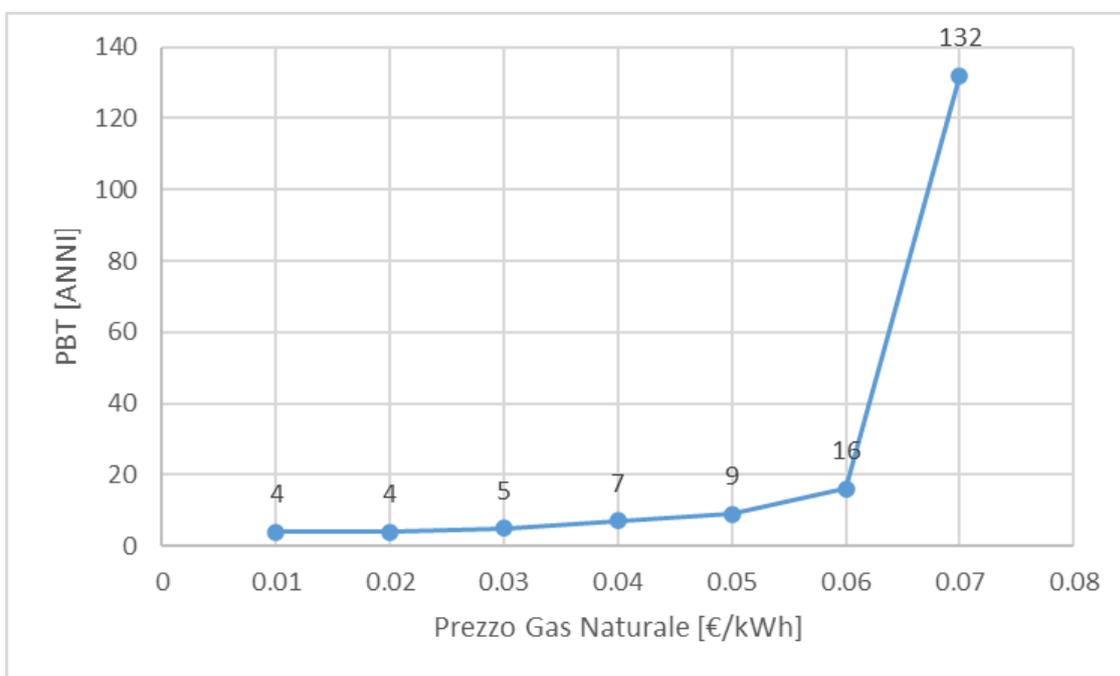


Figura 48. Andamento del PBT al variare del prezzo del Gas Naturale

La Figura 48 mostra l'andamento del PBT al variare del prezzo del Gas naturale. Partendo dall'attuale costo di 0.04 €/kWh, si nota che andando verso costi più bassi il PBT si mantiene all'incirca costante, soprattutto al di sotto dei 0.03 €/kWh, ma è molto importante notare come, spostandosi verso costi maggiori, aumenta notevolmente il peso specifico del prezzo del gas, rendendo il PBT insostenibile economicamente, una volta entrati nella fascia tra 0.06 e 0.07 €/kWh.

Le previsioni dell'Arera, tuttavia sono abbastanza rassicuranti da questo punto di vista, in quanto è previsto un costo del gas leggermente superiore a 0.04 €/kWh fino al 2022, ma che poi tenderà a scendere, fino a stabilizzarsi a 0.03 €/kWh a partire dal 2023[20].

### 7.5.2 Energia elettrica

Un'analisi simile a quella fatta per il Gas naturale è stata svolta anche per i costi dell'energia elettrica.

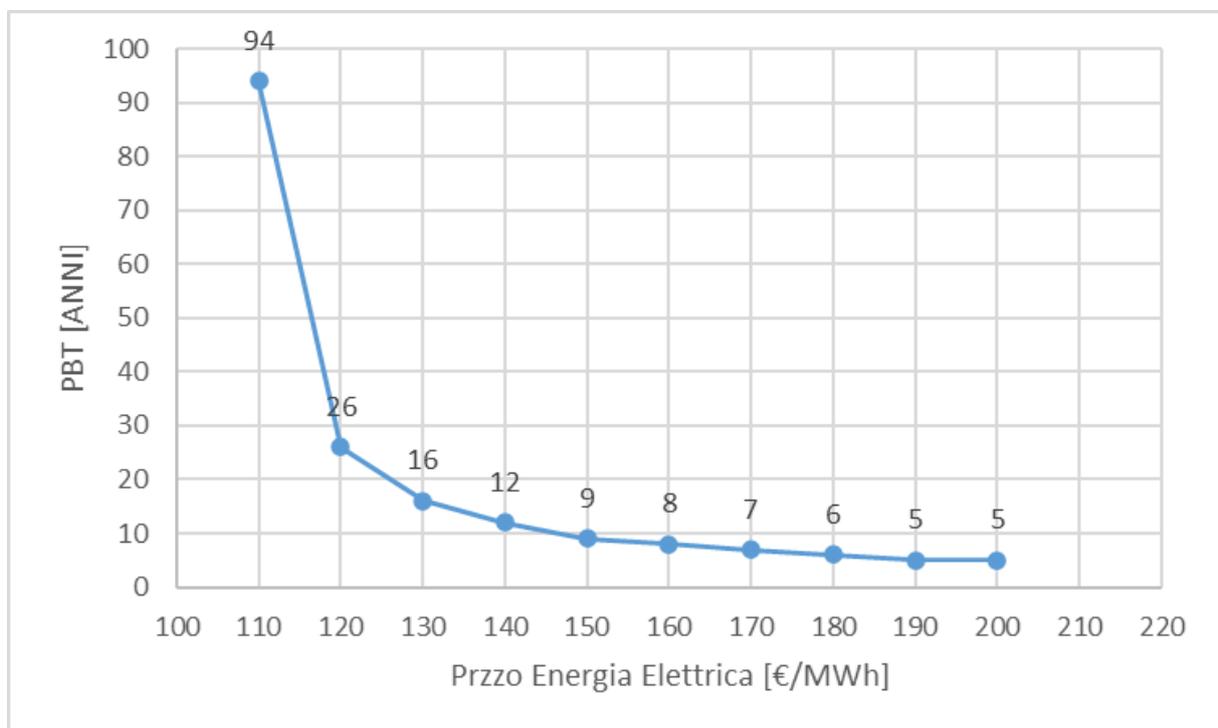


Figura 49. Andamento del PTB al variare del prezzo dell'energia elettrica

Nella Figura 49 si nota subito, come, rispetto al prezzo del gas, il prezzo dell'energia elettrica ha un effetto opposto. Un aumento del costo, porta ad avere un PBT più basso e viceversa. Questa variazione può essere facilmente spiegata: parte della "convenienza" economica di un sistema SOFC, deriva dal fatto di non dover acquistare l'energia elettrica dalla rete di distribuzione rendendo il sistema quasi autonomo, ma una riduzione del prezzo dell'elettricità comporta una conseguente diminuzione del risparmio annuale sull'energia elettrica.

Scendere addirittura sotto i 120 €/MWh renderebbe il PBT troppo grande per essere sostenibile a livello economico. Salire sopra i 170 €/MWh, che è il costo attuale dell'energia elettrica, invece non comporterebbe una notevole diminuzione del PBT, in quanto già abbastanza basso.

Mentre per i consumi di energia elettrica, il margine di manovra è quasi del tutto limitato, per il gas naturale (o un combustibile in generale), ci sono diverse maniere di intervenire:

- Un aumento dell'efficienza delle SOFC, porterebbe a un consumo minore di combustibile ottenendo lo stesso quantitativo di energia prodotta.
- L'adattabilità delle SOFC a diversi combustibili è un'ottima base di partenza per un possibile sviluppo futuro di nuove tipologie di combustibili, anche non fossili come l'idrogeno o il biogas. Il biogas nello specifico potrebbe provenire dal trattamento chimico della frazione organica dei rifiuti solidi urbani, avendo quindi costo e impatto ambientale pari a 0.

Come visto precedentemente, un costo del combustibile pari a 0 abbasserebbe ulteriormente il PBT a 3 anni, considerando anche il fatto che parte del calore prodotto dal sistema SOFC potrebbe essere utilizzato per il trattamento chimico dei rifiuti. Tuttavia, il vantaggio maggiore apportato sarebbe quello ambientale, in quanto si potrebbe contribuire allo smaltimento di parte della frazione dei rifiuti urbani, per la produzione di un combustibile totalmente rinnovabile e che verrebbe utilizzato in un sistema a 0 emissioni.

## 8. Conclusioni

Il cambiamento climatico è riconosciuto come una delle principali sfide che l'umanità sta affrontando nel Ventunesimo secolo. Il settore delle tecnologie dell'informazione e della comunicazione, compresi i Data Centers, genera fino al 2% delle emissioni globali di CO<sub>2</sub>. Si stima che i Data Centers abbiano l'impronta di carbonio con più rapida crescita di tutto il settore, a causa, principalmente, dei progressi tecnologici e della rapida crescita dello sviluppo e dell'utilizzo di Internet. In un mondo in continuo progresso e nel mezzo di una transizione energetica che mira ad abbattere le emissioni, è molto importante che uno dei settori maggiormente responsabile delle emissioni mondiali di CO<sub>2</sub>, miri ad uno sviluppo tecnologico che sia in grado di soddisfare i requisiti di affidabilità e di impatto ambientale.

Da un punto di vista tecnologico, le SOFC, rappresentano la miglior scelta tra le fonti energetiche rinnovabili, sia per la loro affidabilità che per la loro versatilità:

- Sono in grado di adattarsi velocemente alle variazioni del carico, anche quelle più improvvise.
- Raggiungono livelli di Availability anche più elevati della rete elettrica di distribuzione (> 99.999%).
- Non sono dipendenti da agenti esterni (come il clima).
- Integrare un sistema di SOFC ad un Data Center, ne aumenta l'efficienza in termini di PUE e ne abbassa la complessità strutturale, dovuta principalmente a complicati sistemi di alimentazione.
- L'abbattimento delle emissioni è stimato tra il 22 e il 50% in meno.

Tuttavia, lo status di "nuova" tecnologia rende impossibile, allo stato attuale, l'applicazione di un sistema di SOFC, per via di efficienze ancora non altissime, prezzi troppo elevati e dei problemi tecnologici, come la necessità di sostituire uno stack ogni cinque anni: un'analisi svolta con una visione di breve termine ha mostrato come, allo stato attuale, un investimento su questa tecnologia non sia sostenibile a livello economico, per via di costi d'installazione e sostituzione troppo elevati, che portano a PBT superiori a 100 anni.

Risultati molto incoraggianti, però, arrivano dall'analisi svolta con una visione temporale più lunga. Quest'ultima evidenzia che, basandosi su previsioni dell'andamento dei costi, la tecnologia può diventare competitiva sotto tutti i punti di vista, anche economico, arrivando ad avere dei PBT decisamente competitivi. In particolare l'analisi ha dimostrato che:

- È possibile raggiungere PBT, anche inferiori ai 7 anni;
- La produzione contemporanea di energia termica, può essere sfruttata per abbattere ulteriormente costi ed emissioni;
- PBT e NPV non dipendono dalle variazioni dei costi di gas ed energia elettrica, a meno che questi non siano estremi.
- Un miglioramento delle efficienze può portare a un minor consumo di combustibile e una maggior produzione di energia.

Uno sviluppo in parallelo delle efficienze e dei costi, quindi, può rendere le SOFC e le Fuel Cells più in generale, la tecnologia madre verso una transizione energetica che mira alla convivenza tra uno stile di vita sempre più informatico e tecnologico e le risorse del pianeta, oltre che una linea guida nella lotta ai cambiamenti climatici.

## 9. Indice e Riferimenti Bibliografici

### 9.1 Bibliografia

- [1] R. Arno, A. Friedl, P. Gross, and R. J. Schuerger, “Reliability of data centers by tier classification,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 48, no. 2, pp. 777–783, 2012, doi: 10.1109/TIA.2011.2180872.
- [2] H. S. Sun and S. E. Lee, “Case study of data centers’ energy performance,” *Energy Build.*, vol. 38, no. 5, pp. 522–533, 2006, doi: 10.1016/j.enbuild.2005.08.012.
- [3] A. J. Ritchie and J. Brouwer, “Design of fuel cell powered data centers for sufficient reliability and availability,” *J. Power Sources*, vol. 384, no. October 2017, pp. 196–206, 2018, doi: 10.1016/j.jpowsour.2018.02.059.
- [4] “GeSI SMARTer 2020 : The Role of ICT in Driving a Sustainable Future,” 2020.
- [5] F. Cell and T. Program, “Case Study : Fuel Cells Increase Reliability at First National Bank of Omaha Technology Center,” 2009.
- [6] L. Zhao *et al.*, “Fuel Cells for Data Centers : Power Generation Inches From the Server,” *J. Power Sources*, 2014.
- [7] Cogeneration Observatory and Dissemination Europe, “Micro-CHP potential analysis European level report Partner Name : Energy Matters,” no. December, 2014.
- [8] D. Carter, “The Fuel Cell Industry Review 2012 Who is Fuel Cell Today ?,” no. November, pp. 272–273, 2012.
- [9] S. Curtin, J. Gangi, and R. Skukowski, “State States,” no. September, 2012.
- [10] N. Judson, “Interdependence of the Electricity Generation System and the Natural Gas System and Implications for Energy Security,” no. May, p. 35, 2013.
- [11] P. D. Anderson, P. H. Norgaard, M. H. Olesen, and A. N. Tanner, “Final report of the roads2hycom project: fuel cells and hydrogen in a sustainable energy economy.,” *Contrac*, 2009.

- [12] J. Brouwer, “On the role of fuel cells and hydrogen in a more sustainable and renewable energy future,” *Curr. Appl. Phys.*, vol. 10, no. 2 SUPPL., 2010, doi: 10.1016/j.cap.2009.11.002.
- [13] C. Haynes, “Simulating process settings for unslaved SOFC response to increases in load demand,” *J. Power Sources*, vol. 109, no. 2, pp. 365–376, Jul. 2002, doi: 10.1016/S0378-7753(02)00088-5.
- [14] F. Mueller, F. Jabbari, R. Gaynor, and J. Brouwer, “Novel solid oxide fuel cell system controller for rapid load following,” *J. Power Sources*, vol. 172, no. 1, pp. 308–323, Oct. 2007, doi: 10.1016/J.JPOWSOUR.2007.05.092.
- [15] A. E. Auld, F. Mueller, K. M. Smedley, S. Samuelsen, and J. Brouwer, “Applications of one-cycle control to improve the interconnection of a solid oxide fuel cell and electric power system with a dynamic load,” *J. Power Sources*, vol. 179, no. 1, pp. 155–163, Apr. 2008, doi: 10.1016/J.JPOWSOUR.2007.12.072.
- [16] D. Webb and S. Møller-Holst, “Measuring individual cell voltages in fuel cell stacks,” *J. Power Sources*, vol. 103, no. 1, pp. 54–60, Dec. 2001, doi: 10.1016/S0378-7753(01)00831-X.
- [17] X. Wu, H. Xu, L. Lu, J. Fu, and H. Zhao, “The study on dynamic response performance of PEMFC with RuO<sub>2</sub>•xH<sub>2</sub>O/CNTs and Pt/C composite electrode,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 5, pp. 2127–2133, Mar. 2010, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2009.12.039.
- [18] Q. Yan, H. Toghiani, and H. Causey, “Steady state and dynamic performance of proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs) under various operating conditions and load changes,” *J. Power Sources*, vol. 161, no. 1, pp. 492–502, Oct. 2006, doi: 10.1016/J.JPOWSOUR.2006.03.077.
- [19] M. Avgerinou, P. Bertoldi, and L. Castellazzi, *Trends in Data Centre Energy Consumption under the European Code of Conduct for Data Centre Energy Efficiency*, vol. 10, no. 10. 2017.
- [20] R. E. Ambiente *et al.*, “Memoria dell ’ autorità di regolazione per energia reti e ambiente in merito all ’ andamento dei prezzi dell ’ energia elettrica e del gas naturale,” 2021.
- [21] F. D. I. Riscaldamento, P. O. Binomia, and P. O. Binomia, “USO DOMESTICO,”

## 9.2 *Indice delle Figure*

**Non è stata trovata alcuna voce dell'indice delle figure.**

Figura 1. Data center di nuova generazione a Marcoussis (Francia) .....	1
Figura 2 Struttura di un data center .....	4
Figura 3. Principali componenti di un data center .....	4
Figura 4. Sistema di raffreddamento .....	5
Figura 5. Availability vs Cost .....	9
Figura 6. Suddivisione della potenza totale .....	14
Figura 7. Suddivisione delle superfici DCI e DCII.....	16
Figura 8. Condizioni ambientali DCII.....	17
Figura 9. Profilo consumi DCI.....	17
Figura 10. Profilo consumi DCII.....	18
Figura 11. PUE .....	19
Figura 12. Consumo HVAC in funzione delle condizioni esterne.....	19
Figura 13. Suddivisione dei consumi .....	21
Figura 14. Consumi per raffrescamento della temperatura esterna 3 Luglio e 15 Gennaio ..	22
Figura 15. Consumo per raffrescamento in funzione della temperatura esterna 17 Febbraio .....	22
Figura 16. Carico annuale .....	23
Figura 17. Variazione annua del PUE.....	25
Figura 18. Variazioni del PUE nei giorni dell'anno. ....	26
Figura 19. Suddivisione dei consumi annuali .....	26
Figura 20. Tipico sistema di alimentazione di un Data Center. ....	28
Figura 21. Schemi di funzionamento di una PEMFC (A) e una SOFC (B).....	31
Figura 22. Schema di un sistema Fuel Cell.....	32
Figura 23. Paragone tra un sistema tradizionale (a) e un sistema con Celle a Combustibile alimentate da Gas naturale. ....	33
Figura 24. Variazioni di potenza dovuta a spegnimento e riaccensione del server .....	35

Figura 25. Andamento della potenza di un server dopo la sequenza di riavvio .....	36
Figura 26. (A) Foto esterna del testbed, (B) configurazione AC, (C) configurazione DC. ....	37
Figura 27. Curva di polarizzazione e curva di potenza .....	38
Figura 28. Proprietà del sistema di Fuel Cells .....	38
Figura 29. Risposta del sistema alle variazioni di potenza da 0 a 4.5 kW .....	39
Figura 30. Risposta del sistema alle variazioni di potenza da 5 a 10 kW. ....	39
Figura 31. Risposte della Fuel Cell alle operazioni dinamiche dei servers .....	40
Figura 32. Transiente della Fuel Cell in risposta all'accensione di 3 servers (A) o di 9 servers (B) .....	41
Figura 33. Diagramma di efficienza del sistema con UPS integrato (configurazione DC) ...	42
Figura 34. Diagramma di efficienza del sistema con UPS scollegato (configurazione DC) .	42
Figura 35. Perdite di un sistema tradizionale (A) e perdite di un sistema con FC integrate (B).....	43
Figura 36. PUE del Data Center al variare del cooling ratio .....	44
Figura 37. Vantaggi di un sistema Fuel Cells .....	45
Figura 38. Costo della tecnologia di Fuel Cells commerciali .....	48
Figura 39. Carichi annui.....	51
Figura 40. NPV – Analisi a breve termine .....	53
Figura 41. CAPEX vs PBT .....	55
Figura 42. NPV analisi a lungo termine.....	57
Figura 43. Confronto tra NPV target con e senza valorizzazione del calore prodotto. ....	59
Figura 44. Andamento del PTB al variare del prezzo del Gas Naturale .....	60
Figura 45. Andamento del PTB al variare del prezzo dell'energia elettrica.....	61

### ***9.3 Indice delle Tabelle***

Tabella 1. Requisiti della “Tier” classification .....	8
Tabella 2. Livelli di reliability della “Tier” classification .....	10
Tabella 3. Classificazione per taglia .....	11
Tabella 4. Classificazione per densità di potenza .....	12

Tabella 5. Consumi .....	21
Tabella 6. Caratteristiche di PEMFC e SOFC. ....	32
Tabella 7. Data Centers in Europa Occidentale .....	47
Tabella 8. Numero di Data Centers per taglia.....	47
Tabella 9. Cash-flow e NPV – Analisi a breve termine.....	53
Tabella 10. Cash-Flow e NPV – Analisi a lungo termine.....	56