

Gianpaolo Susanna,
Stefano Penna,
Luigi Salamandra,
Vincenzo Attanasio,
Silvia Di Bartolo,
Anna Stefania Michelangeli
- Istituto Superiore delle
Comunicazioni e delle
Tecnologie
dell'Informazione, Ministero
dello Sviluppo Economico,
Roma
- Università degli studi di
Roma Tor Vergata,
Dipartimento di Ingegneria
Elettronica, Roma

Mattia Quadrini,
Andrea Reale
Università degli studi di
Roma Tor Vergata,
Dipartimento di Ingegneria
Elettronica, Roma

Applicazione di sistemi di trasmissione in spazio libero “Free Space Optics” (FSO) in ambienti “Data Center” (DC) dedicati alla gestione ed allo smistamento dati

Application Free Space Optics (FSO) transmission systems in Data Center environments (DC) dedicated to the management and data sorting

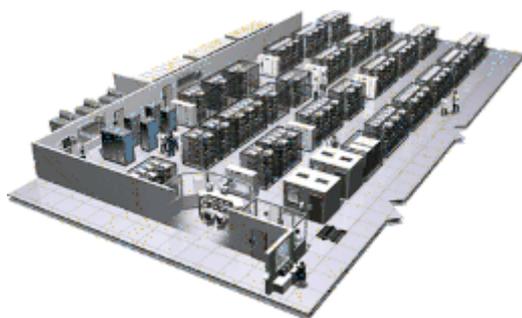
Sommario: La richiesta di una banda sempre più ampia per il trattamento e smistamento dei dati, sta portando la tecnologia ad evolversi sempre più velocemente, ma laddove vengono incontrati limiti tecnici, è vincolante compiere un salto verso nuove tecnologie ancora inesplorate. È il caso questo del problema di gestione e trasmissione dati all'interno di ambienti dedicati denominati Data Center (DC), dove il passaggio a infrastrutture ottiche semplificherebbe enormemente i vari dispendi e problemi incontrati. Nei laboratori del Ministero dello Sviluppo Economico, sono stati sviluppati sistemi di trasmissione dati in aria senza guide d'onda Free Space Optics (FSO) ed è stata dimostrata la funzionalità e l'utilità dei suddetti. A supporto sono riportati anche diversi lavori già presenti in letteratura che trattano lo stesso argomento. Viene inoltre riportata una profonda analisi e un'ampia panoramica su quelle che sono le questioni legate agli ambienti DC da tenere in considerazione per valutare la fattibilità e realizzazione di tale tecnologia al loro interno.

Abstract: The high demand and request of a large bandwidth due to the growing data treatment and sorting, is bringing the technology to evolve faster and faster, but where are encountered technical limitations, it is mandatory to make a leap towards new technologies still unexplored. This is the case of the management and data transmission issues in data management and transmission within dedicated environments so called Data Center (DC), where moving a step forward to optical infrastructures will simplify enormously various expenditures and problems encountered. In the ISCOM laboratories in the Ministry of Economic Development, have been developed Free Space Optics (FSO) data transmission systems and has been demonstrated their functionality and usefulness in DC. To support the aim of this work, several works already present in the literature, are showed. A deep analysis and a broad overview of what are the issues related to DC environments is also reported, to consider and assess the feasibility and implementation of this technology.

1. Introduzione

La tecnologia di trasmissione in spazio aperto in generale prende il nome in letteratura di *Free Space Optics* (FSO); mediante l'uso di ottiche e strumentazioni adeguate è possibile trasmettere pacchetti di dati a larga e ultra-larga banda senza il bisogno di stendere cavi o fibre o quant'altro di veicolante per l'informazione digitale. Negli ultimi anni questa tecnologia ha guadagnato un'attenzione significativa a causa della richiesta odierna di apportare una larghezza di banda sempre più ampia. Rappresenta quindi da questo punto di vista, un'importante risposta alla crisi ed alla scarsità di spettro radio disponibile per la trasmissione dati; è infatti stato dimostrato che soluzioni proposte di tecnologie a radio frequenza, come ad esempio l'uso dei 60GHz, non sono più sufficienti oggi [1].

Negli ambienti *Data Center* (DC), ed in tutte le infrastrutture di elaborazione e *computing* che supportano applicazioni chiave come nella rete Internet, quest'argomento è oggi molto critico. In questo contesto infatti, le reti per DC vanno disegnate accuratamente sotto diversi aspetti, per poterne massimizzare le prestazioni e l'efficienza; bisogna soddisfare diversi scopi che potrebbero andare in potenziale conflitto tra loro, cercando di minimizzare l'eccessiva richiesta di *link* e di raggiungere sempre più una bassa latenza dei dati, riducendone possibilmente l'equipaggiamento ed i costi di gestione. Bisogna inoltre incrementare la flessibilità di adattamento ai cambi di schemi improvvisi del traffico dati ed all'espandibilità degli stessi DC per poter aggiungere nuovi *server* o *rack*; infine, ma non da meno, vi sono altre questioni pratiche che includono la complessità di cablaggio, la potenza ed il raffreddamento. È vero infatti che tecnologie esistenti come il *wireless* e le radio frequenze più in generale, non sono adeguate a questo scopo applicativo su due fondamentali fronti: per prima cosa, questi incorrono in un'enorme interferenza tra segnali (*crosstalking*), creando molte sovrapposizioni e disturbi nella comunicazione; in secondo luogo poi, soffrono di una significativa perdita e attenuazione di segnale sulle lunghe distanze, a causa anche delle regolamentazioni previste per prevenire l'uso di alte potenze e alte frequenze, dannose per l'essere umano [2].



L'esplorazione della tecnologia FSO nei DC, evidenzierà i benefici che offre in questo contesto; l'FSO rappresenta oggi una soluzione disponibile e innovativa per superare molte delle difficoltà e delle questioni precedentemente menzionate. I principali fattori di beneficio sono diversi e molteplici, come a seguire:

- L'FSO utilizza luce visibile o nell'infrarosso, per implementare i vari collegamenti punto-punto, non dannosa per l'essere umano essendo oltretutto le potenze in gioco molto basse
- La trasmissione tramite luce permette un altissima velocità (>1 Gbps) su lunghe distanze
- L'interferenza tra i vari segnali è ridotta al minimo essendo la larghezza del fascio luminoso molto sottile ed avendo un'ottima capacità di regolazione su angoli divergenti tra loro di pochissimi milliradiani e anche meno (1 milliradiante = 0.0573 gradi)
- I dispositivi FSO sono capaci di coprire distanze di diversi chilometri di trasmissioni dati; sistemi del genere di tali portate sono già disponibili in commercio e possono provvedere a velocità fino a 2.5Gbps (per esempio i sistemi "Sonabeam")
- I sistemi FSO possono essere costruiti riproponendo e riusando gran parte dell'elettronica attualmente in uso per i sistemi a fibra ottica, come i ricetrasmittitori ottici inseribili di piccola dimensione SFP (*Small Form-factor Pluggable*) [2]
- La velocità della luce nei sistemi FSO è approssimativamente 1.5 volte maggiore di quella nelle fibre ottiche; questo significa anche meno latenza nelle trasmissioni dati
- Diversamente dai cavi in rame e dalle fibre ottiche, l'FSO è a costo zero; questo significa nessun costo di deposizione, scavi o installazione [3]
- In ambienti DC, l'FSO porta con sé pochissimo lavoro di implementazione, come per esempio la riduzione enorme dei cablaggi, ovviando alla confusione di fili che in questi ambienti si viene facilmente a creare (fig.1) [4,5]

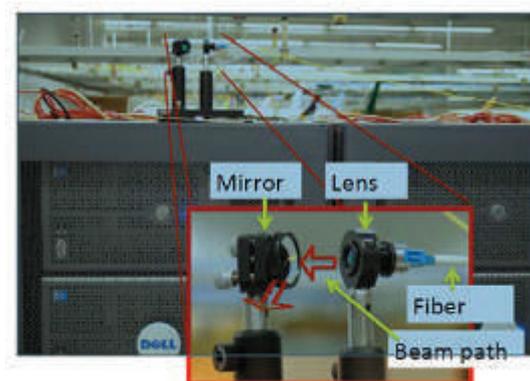


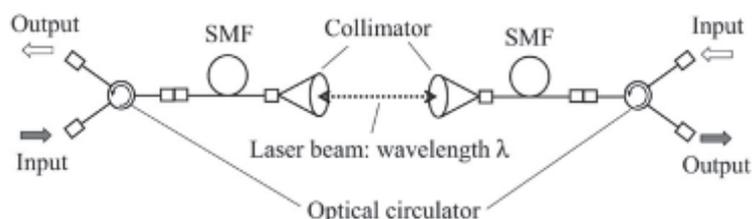
Figura 1. Esempio di applicazione FSO in ambiente "data center" [5]

D'altra parte però, vi sono anche alcune questioni discutibili inerenti ai sistemi FSO: primo tra tutti il costo, circa 5-10000 dollari per un singolo *link*; poi vi è l'ingombro, infatti i sistemi commerciali attuali sono ancora ingombranti, di dimensioni tipiche di circa mezzo metro cubo. Inoltre sono molto dispendiosi energeticamente, in termini di consumo di elettricità e richiedono una chiara visuale sul collegamento detta LOS (*line-of-sight*) anche se è stata dimostrata la possibilità di sormontare ostacoli [5]. Infine c'è da elencare la non banalità nell'allineamento della trasmittente e

ricevente tra loro; infatti essendo il fascio luminoso molto sottile, questo richiede una serie di accorgimenti e strumentazioni meccaniche costose al fine dell'accoppiamento ottimale tra i due.

2. Sistema "passivo" indoor in ambienti chiusi

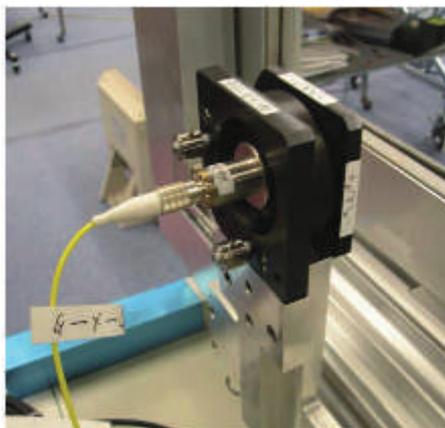
Come già anticipato in precedenza, nei dispositivi FSO si possono riproporre e riutilizzare i ricetrasmittitori ottici comunemente usati denominati SFP, utilizzando in aggiunta solo delle apposite lenti di collimazione e strumentazione ottica dedicata al fine della trasmissione dati. I meccanismi di allineamento sono da considerare variabili a seconda dell'applicazione scelta; per quel che riguarda i DC possono essere di un livello inferiore di complessità rispetto invece a quelli necessari per l'allineamento in ambiente atmosferico aperto su lunghe distanze. Inoltre ad abbassare notevolmente i costi, c'è il discorso sull'uso o meno di conversioni elettro-ottiche digitali per l'emissione e l'acquisizione dati; di fatto, a favore dei costi sul piano dell'approccio "attivo", ovvero utilizzando elettronica di conversione, c'è la semplificazione nella raccolta del segnale luminoso, che non richiede particolare precisione di allineamento. Viceversa utilizzare un approccio di tipo "passivo", ovvero senza ricorrere all'uso di ulteriore semplificazione elettronica di *down-conversion*, ma altresì utilizzare accoppiamenti di fascio ottico direttamente in fibra mediante lenti collimatrici specifiche, porta all'abbattimento sostanziale dei costi. È questo il sistema preferibile in ambienti DC dove come vedremo in seguito, anche il calore generato dagli apparati elettronici, nonché il consumo di elettricità stesso, sono fattori vincolanti da tenere in considerazione; viene da se quindi che l'approccio passivo sia preferibile essendo meno complicato e meno dispendioso. Unica difficoltà da non sottovalutare, come detto è l'allineamento; infatti essendo il segnale collimato direttamente in fibra, questo richiede un altissima precisione al fine di non perdere potenza sul segnale acquisito sfruttando al massimo l'angolo di accettazione della fibra. Diversi lavori si riscontrano in letteratura che dimostrano la fattibilità di questo approccio senza amplificazione extra [6,7]; in figura 2, viene mostrato il tipico schema di trasmissione e ricezione FSO di tipo "passivo".



Il sistema è molto semplice: è composto da sole lenti collimatrici, due "stage" simmetrici di supporto per la fibra così da poter essere regolata manualmente lungo i tre assi (x,y,z) e sulle due inclinazioni (Φ, Ψ),

Figura 2. Schema applicativo di sistema FSO di tipo "passivo" [6]

due fibre a singolo modo SMF (*Single Mode Fiber*) ed una sorgente e ricevente per la generazione e ricezione del segnale. In figura 3a è mostrato lo "stage" di supporto con fibra entrante e lente collimatrice.



3 a)



3 b)

Dato che i ricetrasmittitori SFP (fig. 3b) da 10Gbps costano circa 250 dollari, è stato stimato che un dispositivo FSO può essere costruito con all'incirca \$750; il che tutto sommato risulta essere comunque un costo non eccessivo considerati i vantaggi che ne conseguono. Essendo inoltre gli SFP stessi molto piccoli, un intero apparato può essere messo insieme nello spazio di circa $10 \times 20 \text{cm}^2$ (ovvero un piede quadrato circa) e con raggi di azione possibili e affidabili nell'ordine di 100-200m ovvero un *range* del tutto normale e abituale nella maggior parte dei DC del mondo. Infine, ma non da meno, è importante sottolineare il fatto che non è **necessaria nessuna amplificazione aggiuntiva essendo i comuni SFP da 1 watt di potenza**, più che sufficienti per realizzare un ponte ottico.

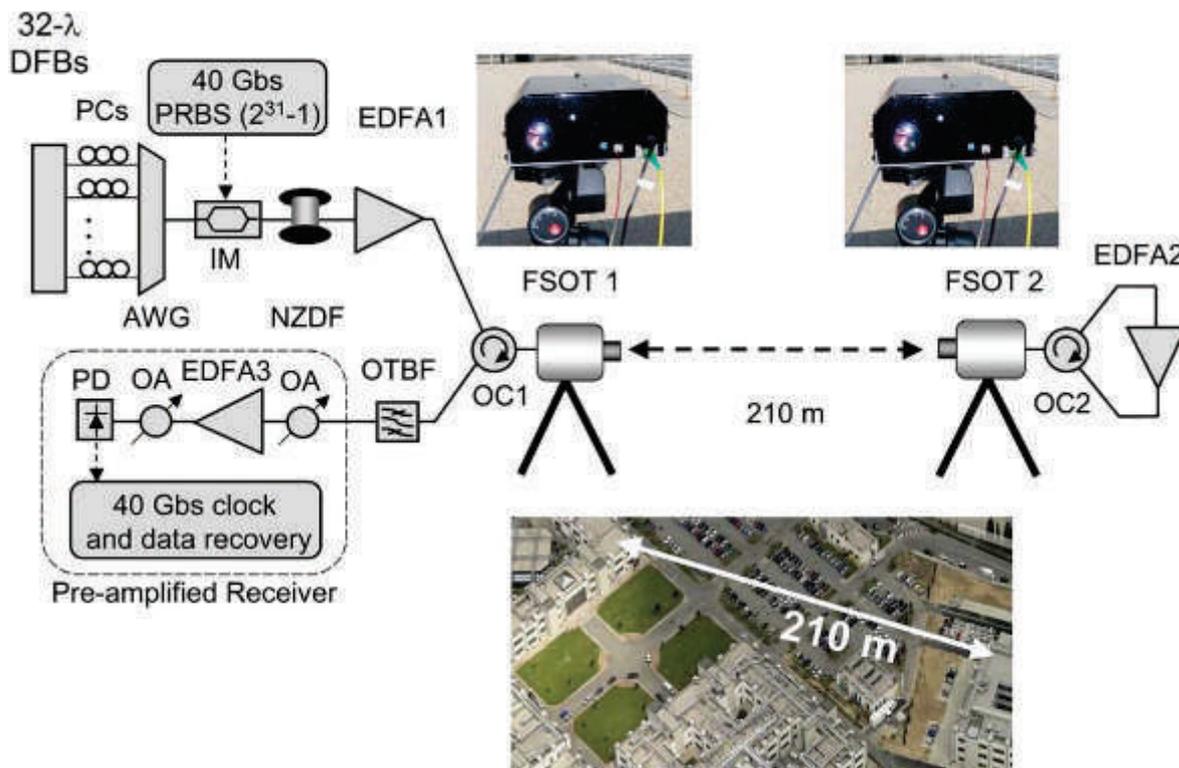
Figura 3a. Esempio di accoppiamento FSO "passivo" lente-fibra con stage manualmente re-golabile [7]

Figura 3b. Esempio di comune ricetrasmittitore SFP

3. Sistema "attivo" outdoor in spazio aperto

È importante in quest'ambito menzionare l'applicabilità di questi sistemi anche su spazio atmosferico aperto; in un esperimento portato avanti dal prof. Ciaramella della Scuola Superiore Sant'Anna di Pisa, in collaborazione con il prof. M. Matsumoto della *Waseda University* in Tokyo, è stata dimostrata una trasmissione dati su una distanza di 210

metri in spazio aperto con una larghezza di banda da 1,21Tb/s (ovvero 32 canali da 40Gb/sec) [8] (fig. 4).



In quest'esperimento, essendo le attenuazioni atmosferiche diverse e più consistenti rispetto a quelle riscontrabili in un ambiente *indoor*, sono stati utilizzati apparati attivi di amplificazione del segnale il quale è stato trasmesso in *double pass* ovvero sia in andata che in ritorno; ad ogni passaggio il segnale veniva amplificato da amplificatori in Erbio detti EDFA (*Erbium Doped Fibre Amplifier*) e centrato a circa 1550nm di lunghezza d'onda. Nello stesso esperimento è stato valutato anche il BER (*Bit Error Rate*) ovvero il numero di bit trasmessi e non ricevuti in errore, ed è stato misurata una penalità minore di 1dB di potenza, ottenendo un valore $BER=10^{-9}$ [8].

4. Soluzioni di interconnessione

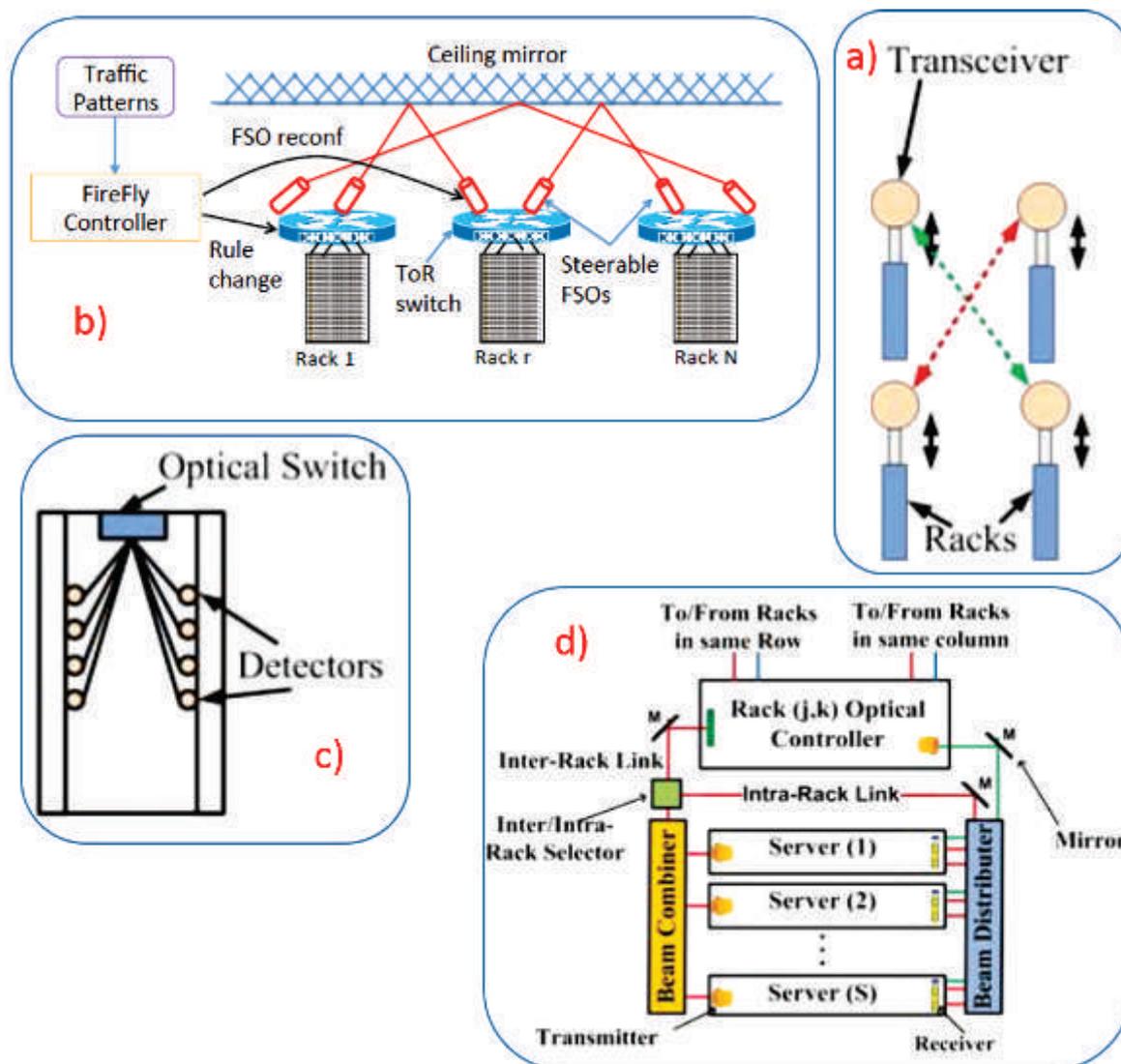
Nell'ambito DC è di rilevanza costruttiva, il disegno e l'architettura dello stesso; in particolare la scelta di quale soluzione di interconnessione utilizzare tra i vari *server* e *rack* all'interno di un DC. Vi sono infatti molti tipi a seconda delle necessità e delle caratteristiche del DC stesso; tra i principali più in uso vi sono:

- Interconnessioni a piattaforma con piedistallo montato sulla parte superiore del rack denominati TOR (Top of the Rack); questo permette il movimento verticale e di rotazione in modo tale che i

Figura 4. Sistema di trasmissione "outdoor" in spazio aperto con una larghezza di banda da 1,21Tb/s (32 canali da 40Gb/sec) [8]

collegamenti in linea-di-vista (LOS) siano stabiliti tra i diversi *rack*. Questo approccio però, necessita di incorporamento di un sistema meccanico per stabilire i collegamenti FSO, aumentando notevolmente la complessità e la latenza del sistema e aumentando il rischio di fallimento nel collegarsi (fig. 5a) [9].

- Comunicazioni interne tra i diversi rack mediante l'uso di TOR (*Top of Rack*) *switches*, ovvero interruttori per evitare riconfigurazioni meccaniche dei ricetrasmittitori FSO e con l'uso di specchi commutabili SMs (*Switchable Mirrors*) posti in cima ad ogni *rack* (pre-allineato per connettersi ai diversi *rack*). In pratica un collegamento viene diretto e riflesso da uno specchio sul soffitto ad altri *rack* (i convenzionali specchi possono facilmente riflettere sia il visibile che infrarosso (IR) con perdita trascurabile e pertanto il costo stesso dello specchio a soffitto diventa trascurabile). Vi è però un numero limitato di collegamenti possibili attivi nello stesso momento ed un tempo di ritardo da considerare, associato alla variazione di stato dello specchio (fig. 5b) [9].
- Collegamento bidirezionale *point-to-point*, sorgente-ricevente; il TOR *switch* è collegato ai server all'interno del *rack*. L'interruttore quindi indirizza le informazioni ai server utilizzando una "doccia" di raggi ottici portanti dati. Svantaggio di tale disegno è il numero di ricetrasmittitori pari al numero di server; per un gran numero di server, questo disegno è insostenibile (fig. 5c) [9].
- Collegamento FSO completamente cablato *fully-connected*, senza interruttori ottici e senza meccanica o collegamenti adattivi/riconfigurati; ogni server è dotato di un trasmettitore ottico e un ricevitore ottico. Utilizzando il selettore *intra/inter-rack*, ogni server può ricevere una copia delle informazioni tramite dei divisori di fascio ottici (fig. 5d) [9].



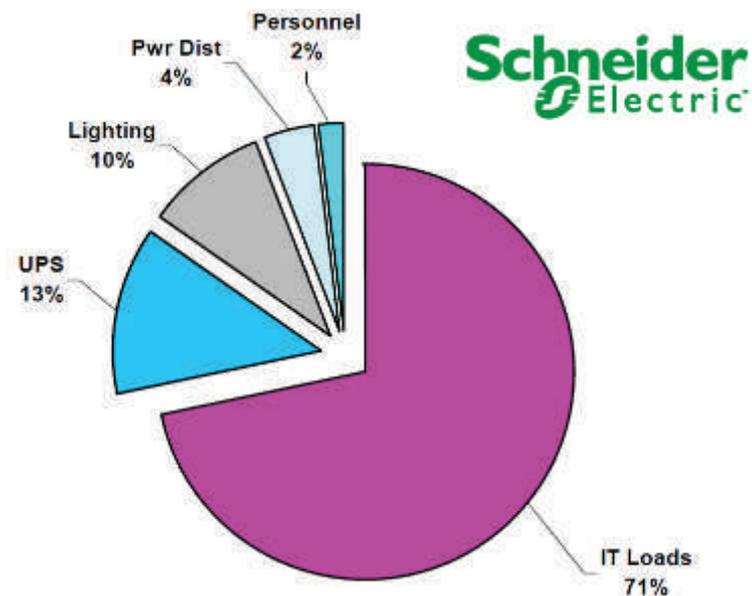
5. Ambienti Data Center

Per capire come utilizzare al meglio il sistema di trasmissione ottico FSO all'interno di un DC, è strettamente raccomandato conoscere il DC stesso in termini di struttura, efficienza e consumo energetico; questo è necessario al fine di valutarne poi le turbolenze che si creano all'interno di questi ambienti, tali da andare a perturbare il segnale ottico in misura più o meno influente a seconda dei casi. Vi sono infatti architetture e strategie per disegnare un DC, così da ottimizzarne i consumi energetici, cercando di mantenere una temperatura adeguata all'interno al fine di ottenere un risparmio ed una resa maggiori; è di rilevante importanza in questo studio in particolare, l'effetto della temperatura, dell'umidità e delle correnti convettive che si creano all'interno dei DC, dovute all'aria calda prodotta dall'elettronica circostante e dall'aria fredda di raffreddamento immessa negli ambienti stessi. Grandi compagnie

Figura 5. Esempio di interconnessioni FSO in ambienti data center: a) Top of the Rack, b) Switchable Mirrors, c) point-to-point e d) fully-connected [9]

elettriche affermate oggi, forniscono dati a sufficienza per valutare la fattibilità dell'FSO all'interno dei DC; di seguito vengono riportati alcuni esempi.

Schneider Electric riporta un esempio tipico e generico di quali sono i parametri di un DC da andare a considerare per il dimensionamento e in che percentuali influiscono sull'efficienza e il consumo generale del DC; per dimensionamento si intende soprattutto quello volto agli apparati di raffreddamento, in quanto il mantenimento di una temperatura adeguata all'interno, influisce notevolmente sull'efficienza finale del DC. In un tipico DC, la tecnologia dell'informazione (IT), ovvero l'equipaggiamento e le attrezzature elettroniche di elaborazione e smistamento dati, ricopre circa il 70% del dispendio energetico con conseguente produzione di calore; vi è poi un 13% dovuto ad impianti di emergenza UPS (*Uninterruptible Power Supply*), un 10% dedicato all'illuminazione, un 4% per la distribuzione energetica ed infine un 2% dovuto al personale all'interno (fig. 6) [10].

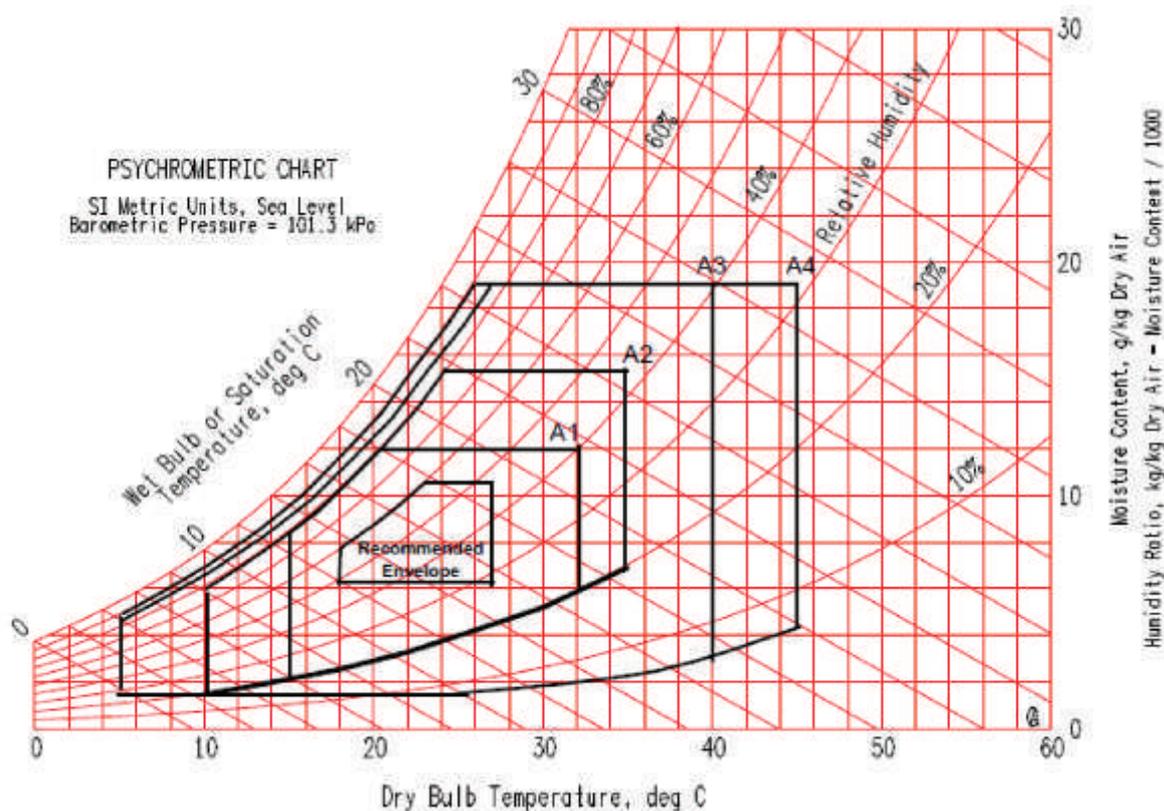


Il calore è energia e viene comunemente espressa in Joule, BTU, "tonnellate", o calorie, dove: BTU all'ora (Unità Termica Britannica, 1BTU=3.41W), "tonnellate" al giorno (si riferisce alla capacità di raffreddamento del ghiaccio; risale al periodo 1870-1930, quando la refrigerazione e la capacità di condizionamento venivano dati dalla consegna giornaliera di blocchi di ghiaccio), e Joule per secondo (pari ai Watt). La potenza assorbita dalla rete di alimentazione AC invece, è essenzialmente tutta convertita in calore. Il calore termico generato ne risulta quindi semplicemente calcolato dalla potenza assorbita in ingresso. E' questa una stima veloce e approssimativa, ma comunque soddisfacente ed ha inoltre come vantaggio quello di poter esser stilata da chiunque senza una specifica conoscenza o preparazione; nell'esempio in figura 6 viene preso in esame un ambiente di circa 500m² (5,000ft²) con 250kW di potenza assorbita, con 150 racks ed un massimo di 20 persone all'interno.

Figura 6. Esempio di ripartizione dei consumi energetici e della produzione di calore all'interno di un DC [10]

Considerando un utilizzo al 30% della capacità, che è tipico in questi ambienti (di fatto non si lavora mai a regime massimo), il carico ne risulterebbe di 75kW; quindi in prima approssimazione si può considerare un uscita termica di circa il doppio, ovvero 105kW termici. Banalmente quindi per stimare il condizionamento di raffreddamento necessario, basti considerare il 30-50% in più della dell'assorbimento della tecnologia d'informazione in possesso. In effetti a conti fatti, si nota come la metà dei consumi di un DC, sia dato proprio dalle infrastrutture di raffreddamento.

In figura 7 vengono mostrate le categorie dei DC, ovvero quelle che sono le classi energetiche di efficienza; in funzione della temperatura e dell'umidità dell'aria, si possono definire le zone ideali cui mantenersi per la miglior resa in termini di consumi e raffreddamento. In particolare è stato osservato come il rendimento sia ottimale intorno ai 22°C ed un 40-50% di umidità a pressione atmosferica (livello del mare) [11].



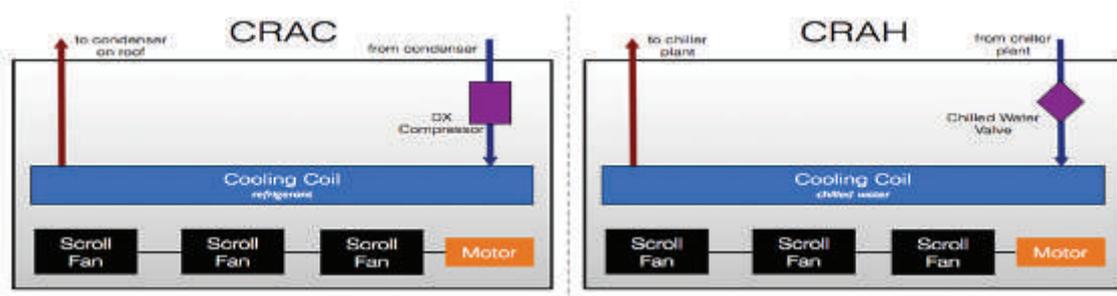
6. Strategie convenzionali per raffreddamento di ambienti Data Center

Come precedentemente accennato, il nostro studio prevede la valutazione delle possibili perturbazioni d'aria sui sistemi FSO all'interno degli ambienti DC; perturbazioni dovute a cambi di temperatura, umidità e ventilazione causata dal necessario raffreddamento richiesto in questi ambienti. Le soluzioni di raffreddamento e deumidificazione più comuni

Figura 7. Classi energetiche di efficienza in ambienti DC [11]

nel mondo sono anche le più semplici ed economiche dal punto di vista strutturale e pratico di realizzazione; ciò però non vuol dire che siano anche le più efficienti. Al contrario, strategie più efficienti sono molto più costose, ma allo stesso tempo molto meno comuni (soluzioni *ad hoc*) e quindi meno ricercate. Anche se ci sarebbe molto di cui parlare a riguardo, in questo ambito non si scenderà in dettaglio; è infatti di nostro interesse andare a studiare quelle che sono le condizioni più comuni e commerciali di utilizzo.

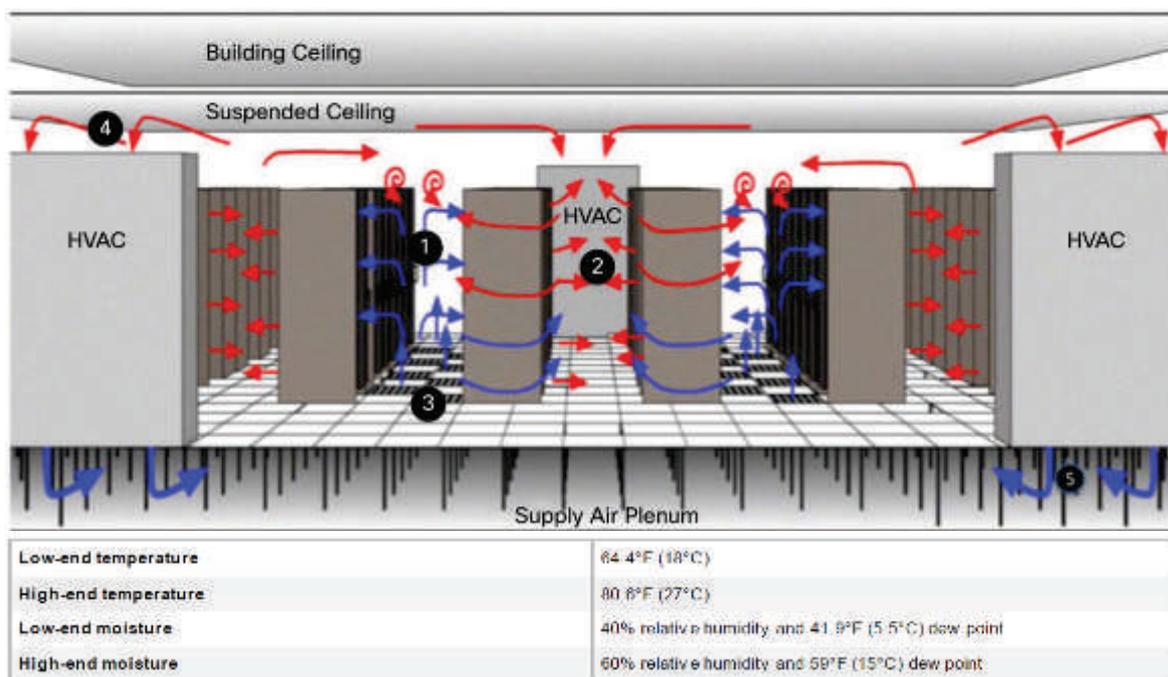
Le tipologie di raffreddamento più comuni all'interno di ambienti DC sono fondamentalmente due: le cosiddette *Computer Room Air Conditioner* (CRAC) o le *Computer Room Air Handlers* (CRAH) (fig. 8) [12].



Un'unità CRAC è esattamente come il condizionatore d'aria ad uso domestico; ha un ciclo di refrigerazione ad espansione diretta integrato nell'unità. Ciò significa che i compressori necessari per alimentare il ciclo di refrigerazione sono situati anch'essi all'interno del DC. Il raffreddamento è realizzato soffiando aria su una spirale elicoidale riempita con gas refrigerante; quest'aria fuoriesce direttamente nell'ambiente DC, creando ovviamente moti e correnti d'aria lungo tutto lo spazio, cosa quindi non gradita dal punto di vista funzionale dei sistemi FSO. Viceversa le unità CRAH funzionano esattamente come i refrigeratori d'acqua detti *chiller*; sono sistemi molto comuni in grattacieli e edifici per uffici commerciali. Il raffreddamento è realizzato soffiando aria su una spirale attraversata da acqua e refrigerante. Le CRAH possono essere modulate in velocità delle ventole per mantenere una pressione statica all'interno, una soluzione quindi più favorevole per applicazioni FSO.

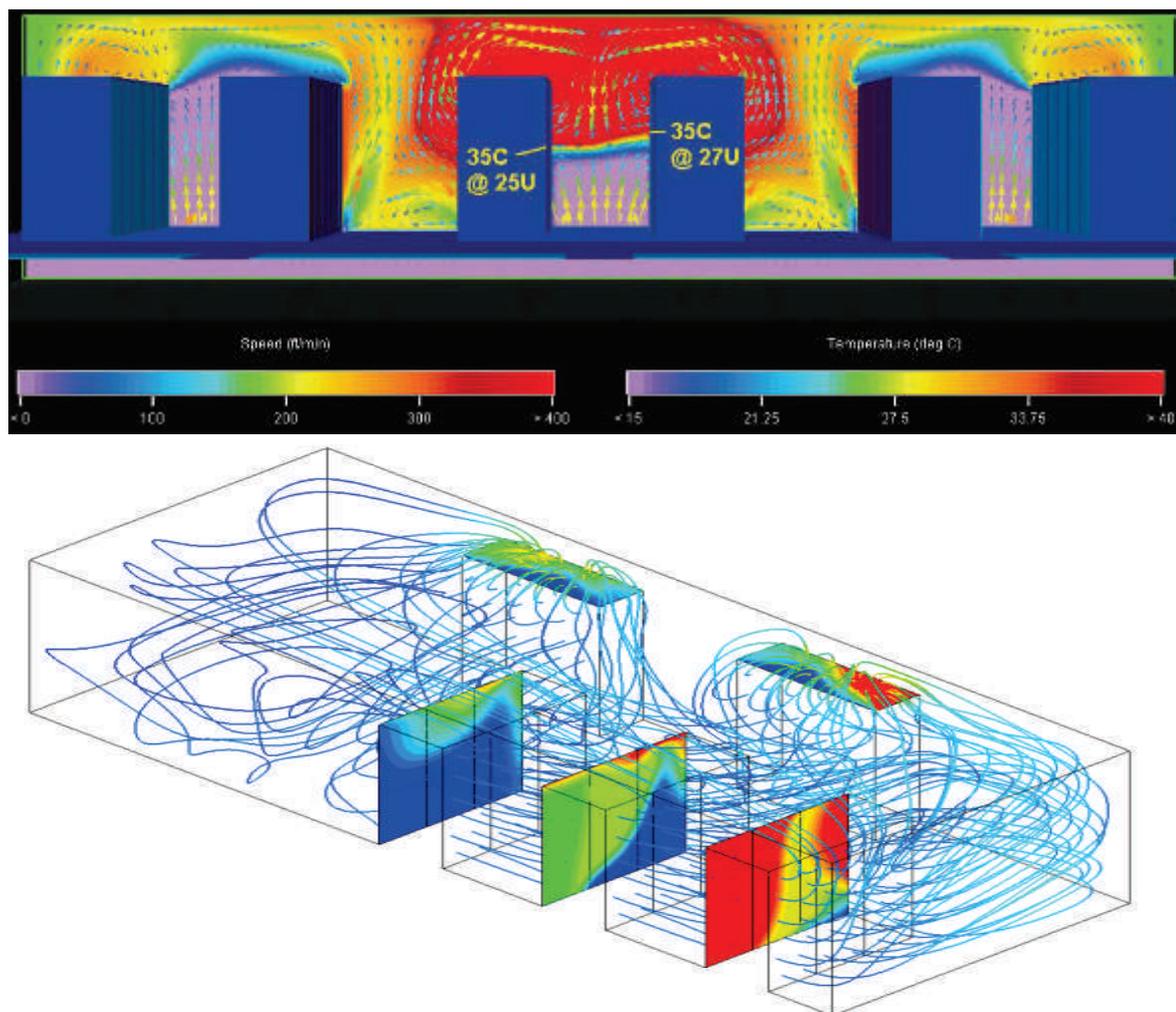
Figura 8. Sistemi di raffreddamento più comuni in ambienti DC: Computer Room Air Conditioner (CRAC) o le Computer Room Air Handlers (CRAH) [12]

Anche l'architettura dell'ambiente DC è cosa importante da tenere in conto; l'efficienza energetica essendo funzione del refrigeramento, è data anche dal disegno del DC. Comunemente la strategia più funzionale è quella di creare dei corridoi di aria calda e fredda tra i vari *rack* e le varie *row* (ovvero file di *rack*), in modo da canalizzare l'aria in un senso unico, senza sovrapposizioni; questo approccio prende il nome di *Hot-Aisle and Cold-Aisle* (HACA) (fig. 9) [13].



In pratica l'aria fredda viene canalizzata dal basso, dalle pavimentazioni, ed entra nei vari row che sono opportunamente orientati, per poi fuoriuscire frontalmente ed essere riassorbita dall'alto dai condizionatori per poi essere di nuovo refrigerata; questo approccio consente la non sovrapposizione e miscelamento di aria calda e fredda insieme, che comporterebbe spreco e consumi elevati di refrigerazione. In questo modo è più semplice mantenere una temperatura all'interno tra i 18° e i 27°C con un'umidità relativa del 40-60%. Per valutarne le concentrazioni di aria calda e fredda e i loro movimenti all'interno del DC, viene fatta un'analisi di tipo computazionale dei fluidi CFD (*Computational fluid dynamics*), ovvero un modello analitico per sistemi di fluidi o di aria come appunto nel caso dei DC e in particolare della struttura HACA (fig. 10) [14-16].

Figura 9. Architettura tipica per ambienti DC: Hot-Aisle and Cold-Aisle (HACA) e relativa tabella dei valori ottimali all'interno [13]



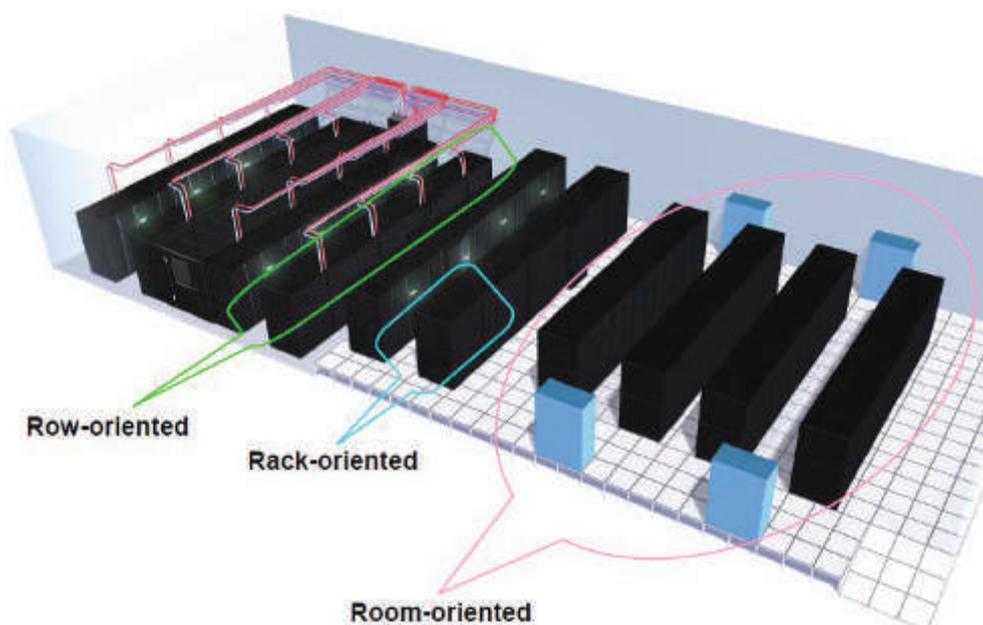
Con questo tipo di analisi si possono calcolare e rendere definite le differenze di temperature che si creano all'interno del DC, che sono poi quelle che vanno a creare i "venti" e le turbolenze tra varie zone; in base ai CFM (*Cubic Feet per Minute*), definiti come:

$$\text{CFM} = 1.78 \times \frac{\text{equipment power (W)}}{\text{temperature difference (}^{\circ}\text{C)}}$$

ovvero il rapporto tra la potenza totale dell'equipaggiamento e la differenza delle temperature calda e fredda ($\Delta T = T_{\text{hot}} - T_{\text{cold}}$), si può stabilire a priori quale sarà il divario dei vari corridoi. In altre parole, non è strettamente necessario sapere tutti i parametri del DC e si può quindi derivare a quelli mancanti mediante calcolo. Per esempio si può assumere che per ogni 100W di potenza impiegata siano necessari 9 CFM per mantenere il divario di temperature nell'intorno dei 20°C; infatti minore sarà il divario maggiore sarà l'efficienza e minore il numero di perturbazioni all'interno.

Figura 10. CFD in ambienti DC: valutazione delle temperature e moti d'aria[14-16]

Altre soluzioni di architetture più efficienti ed economiche su lungo raggio, sono ben note in letteratura, come ad esempio le *rack oriented* o *row oriented* (fig. 11) [15];



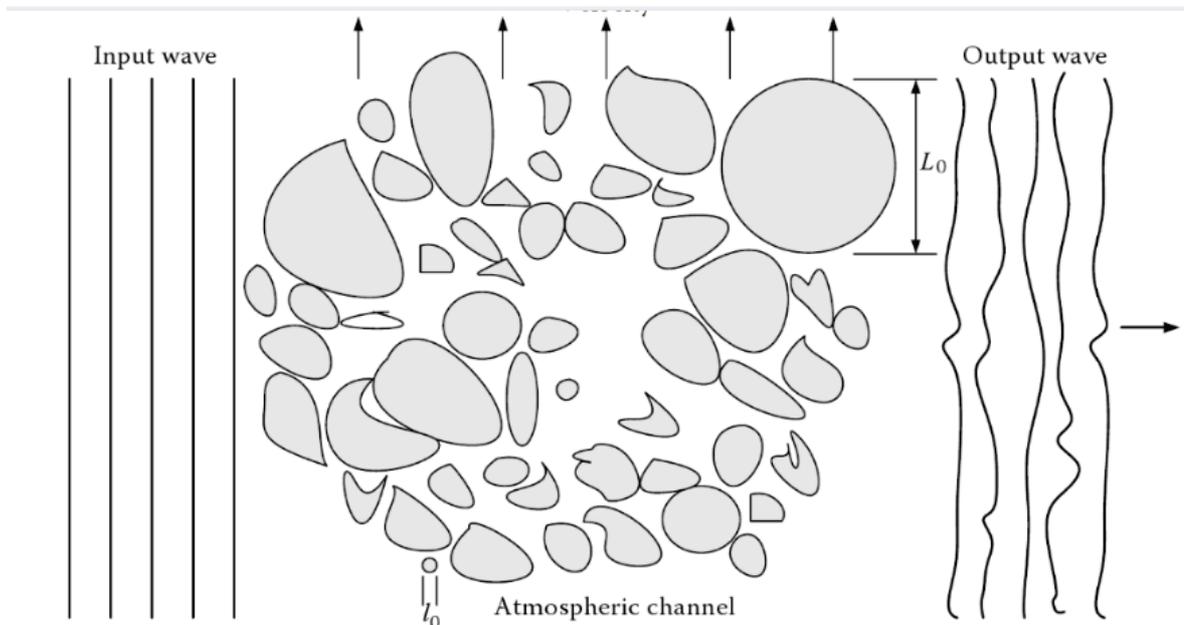
non sarà però questo l'ambito di discussione a riguardo, in quanto le suddette tipologie non perturbano direttamente l'ambiente circostante. Essendo di fatto sistemi chiusi, rendono infatti di per sé direttamente applicabili i sistemi FSO, con tutti i vantaggi che ne conseguono, ma non è lo scopo del presente studio; è altresì infatti mirato all'analisi di quegli aspetti perturbativi che ne limitano la fattibilità.

7. Turbolenze in ambienti DC

I moti d'aria che si possono creare all'interno di un DC sono svariati e molteplici; sono dovuti in prima istanza alle correnti d'aria degli impianti di refrigerazione che sono, come visto, necessari e importanti al fine di una resa ottimale. Il condizionamento non è quindi evitabile se non utilizzando strategie più complesse e dispendiose menzionate nel paragrafo precedente. Vi è poi il movimento del personale all'interno che anch'esso contribuisce al perturbamento delle zone di aria, il quale non da meno, contribuisce all'innalzamento delle polveri all'interno del DC, le quali possono disturbare la trasmissione di un sistema FSO disperdendone il segnale e assorbendone potenza utile erogata. Il tutto rende quindi il sistema assai imprevedibile ed imprescindibile da un'analisi empirica. In letteratura sono presenti modelli teorici per definire questi moti *random*, ovvero casuali, e le cause che li determinano; è stato stabilito che le turbolenze atmosferiche di un sistema chiuso o aperto che sia, sono dovute a fluttuazioni randomiche dell'indice di rifrazione lungo il cammino ottico del segnale. Le fluttuazioni dell'indice di rifrazione sono diretto

Figura 11. Architetture di ambienti DC per incrementare l'efficienza ed il raffreddamento [14]

prodotto finale delle variazioni della temperatura atmosferica da punto a punto; questi cambiamenti *random* di temperatura, sono funzione della pressione atmosferica, altitudine e velocità del vento. Il fronte d'onda viene quindi distorto da vortici più o meno grandi (da pochi millimetri a diversi metri) che si creano e determinano le turbolenze, causando dispersioni e scintillii che rendono vano il segnale trasmesso (fig. 12) [17].



La ampiamente accettata "ipotesi di Taylor" dichiara che "i vortici turbolenti sono fissi o congelati e possono muoversi solo nella loro forma congelata, nella componente trasversale alla principale del vento locale; significa che le variazioni temporali della forma d'onda o delle sue proprietà statistiche, sono causate dalla componente del vento locale che è perpendicolare alla direzione di propagazione del fascio.

Il più diffuso tra questi modelli è la distribuzione *log-normal* e *Gamma-Gamma*, che ben descrivono il regime di turbolenza debole e medio-forte rispettivamente [17]; nel caso di ambienti DC è sicuramente sufficiente un approccio di tipo logaritmico, ma non verrà preso in dettaglio il modello in questa istanza, quanto invece più gli aspetti constatati nei nostri laboratori.

Parametri importanti per classificare una trasmissione dati in termini di qualità e stabilità, sono il fattore **Q** (*Q factor*) ed il **BER** (*Bit Error Rate*), definiti come:

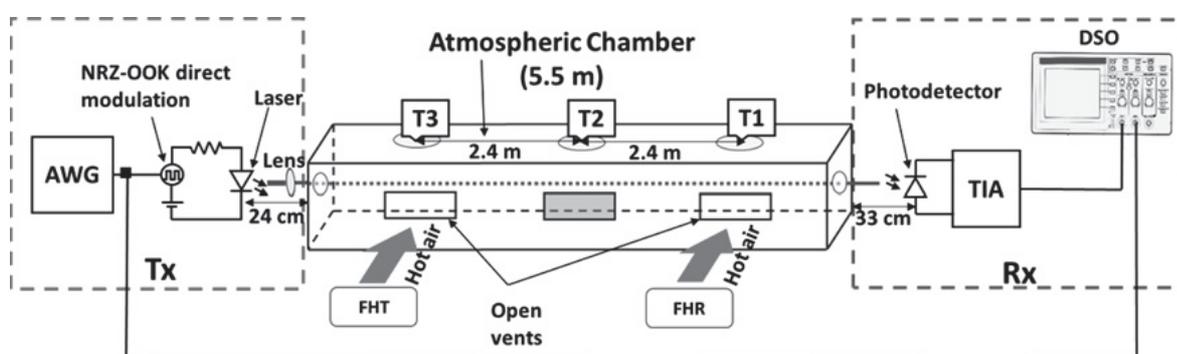
$$Q = \frac{v_H - v_L}{\sigma_H + \sigma_L} \quad \left| \quad \text{BER} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \right.$$

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-u^2} du$$

Figura 12. Fronde d'onda distorto da vortici perturbativi su di un canale atmosferico [17]

dove v_H e v_L sono i rispettivi voltaggi ricevuti e σ_H e σ_L sono la deviazione standard dai livelli alto e basso del segnale (*High* e *Low*); l'*erfc* invece è la funzione di errore, la quale determina l'andamento del BER.

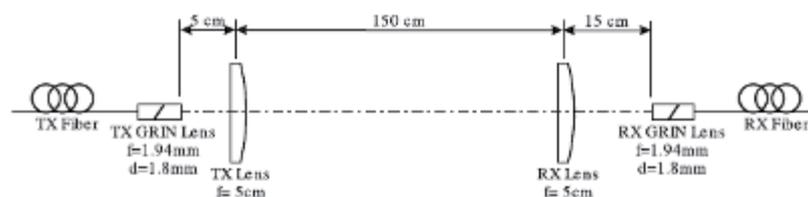
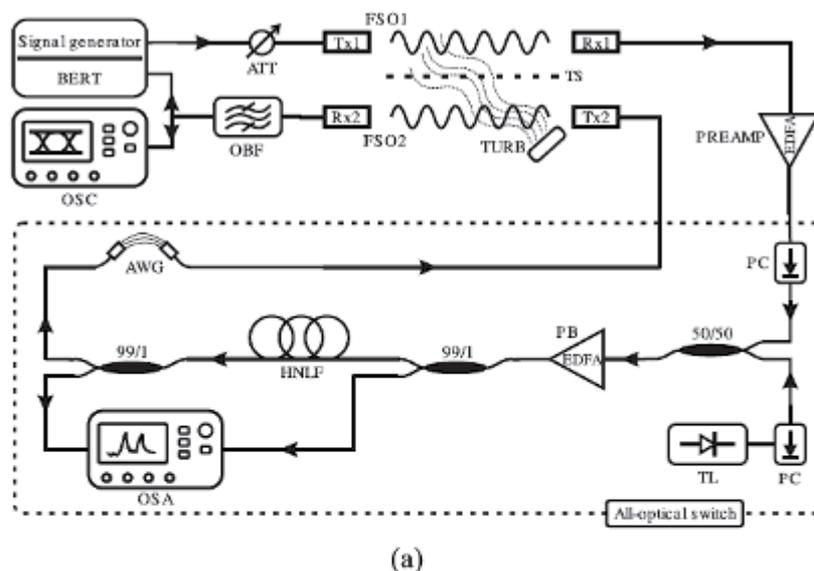
Per riprodurre sperimentalmente una condizione di turbolenza quindi, sono necessari alcune condizioni climatiche; è importante, al fine del raggiungimento dello scopo, creare un gradiente di diversità di almeno 6°C di differenza da punto a punto, in modo da creare correnti ascensionali di aria calda e moti convettivi che creino il vortice perturbativo. In letteratura sono presenti diversi lavori che indagano sul fenomeno delle turbolenze in ambienti *indor* misurandone le suddette caratteristiche in presenza di perturbazioni. In un lavoro del 2015 è stato creato un link ottico di 5,5m fatto passare all'interno di una camera atmosferica attraversata da fonti di aria calda (fig. 13) [18];



la temperatura all'interno della camera atmosferica, è qui in grado di raggiungere fino a 50-60°C con un gradiente di temperatura maggiore di 6°C, lungo la camera come richiesto per la creazione di turbolenze. L'accoppiamento in quest'articolo è di tipo "attivo" con fotorilevatori e conversione digitale.

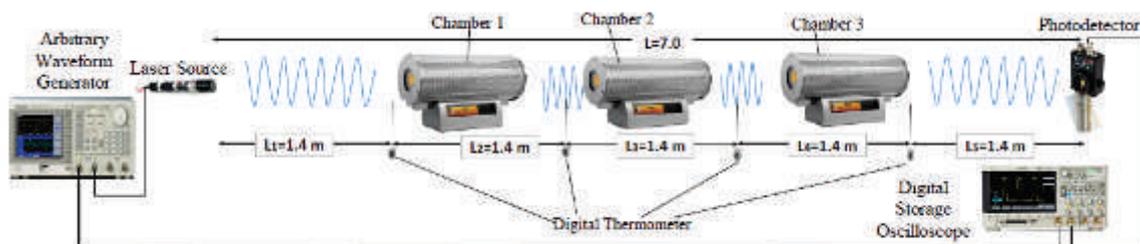
In un altro lavoro dello stesso anno è stato tirato su un set-up detto "a doppio salto" (*dual hop*) in quanto il segnale trasmesso al di là del ponte ottico, viene poi amplificato e ritrasceso indietro su un altro ponte ottico, entrambi attraversati da perturbazione di calore ventilata regolabile in intensità (fig. 14) [19];

Figura 13. Set-up FSO di analisi e misura del BER con perturbazioni d'aria calda [18]



il ponte ottico è in questo caso di tipo passivo con accoppiamento direttamente in fibra (più complicato da calibrare). Il salto ha una lunghezza di 1,5m in andata e in ritorno per un totale di 3m; il collegamento *dual-hop* presenta migliori performance di BER rispetto al singolo salto, ma necessita di amplificazione per tornare indietro mantenendo lo stesso numero di pacchetti informativi. È stato dimostrato come un sistema con tutti i passaggi ottici a livello di trasferimento intermedio, può notevolmente mitigare le turbolenze indotte e relative attenuazioni di segnale; inoltre è questo il primo lavoro presente in letteratura ad avere un sistema a due canali FSO completamente ottici in *dual-hop* ed avere tassi di *bit rates* di 10Gbit/s. Un differente, ma simile approccio è stato usato da un altro gruppo di ricerca che ha sviluppato un sistema FSO con il segnale passante per 3 distinte camere termiche impostabili a diverse temperature nell'intervallo tra i 25°C e i 1200°C; all'interno di queste sono state ricreate condizioni di medio e forte regime perturbativo (fig. 15) [20].

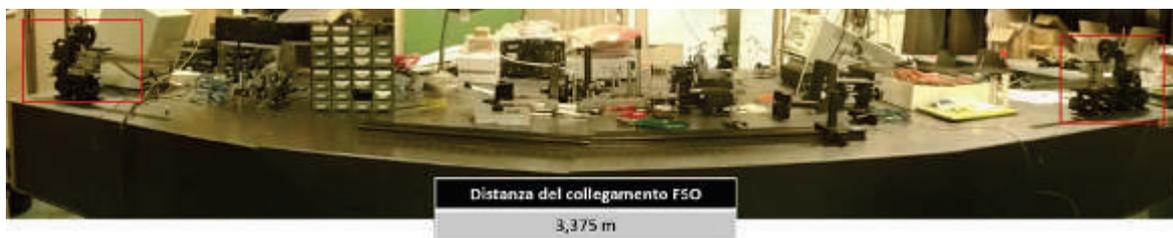
Figura 14. Set-up FSO in dual-hop con perturbazioni d'aria calda [18]



Il segnale in questo caso ha percorso una distanza di 7m ed è stato scaldato fino a quasi 100°C. La turbolenza è stata poi descritta basandosi sul modello di distribuzione *gamma-gamma* e ne sono stati estratti vari valori di BER ottenuti a seconda delle combinazioni delle 3 camere. Il sistema come mostrato, non è completamente ottico in quanto ha utilizzato un *fotodetector* per l'acquisizione, ma la qualità del segnale è risultata molto alta dimostrando la fattibilità della trasmissione e mantenendo valori di *Q factor* accettabili.

8. Set-up sperimentale

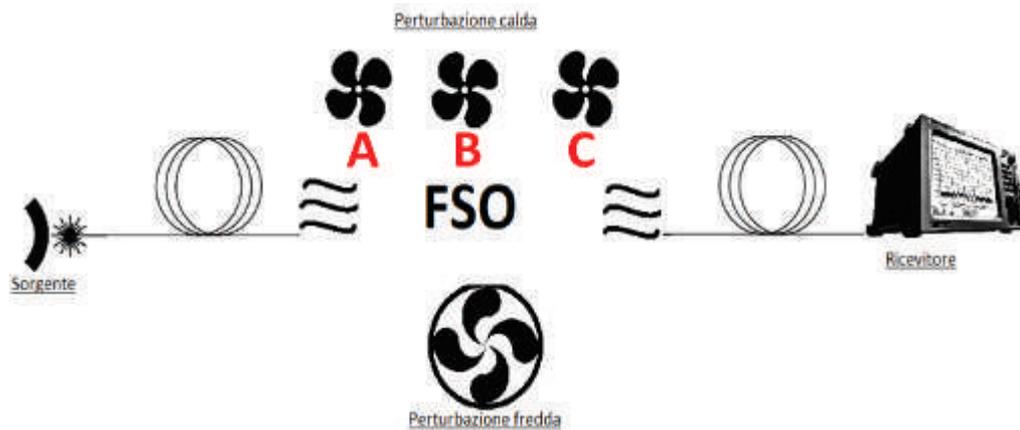
Nei laboratori ISCOM del Ministero dello Sviluppo Economico, è stato sviluppato un approccio simile a quelli precedentemente visionati; è stato assemblato un set-up per FSO sperimentale, con trasmissione in spazio libero su una distanza di 3,375m (fig. 16).



Il set-up dal punto di vista costruttivo è abbastanza semplice; viceversa è risultata complicata la calibrazione e la messa a punto. Gli allineamenti di accoppiamento tra lenti e fibre infatti, non sono banali e richiedono molto tempo. Il set-up è composto da una sorgente laser a feedback distribuito DFB (*Distributed Feedback Laser*) per applicazioni WDM (*Wavelength-Division Multiplexing*) ad una lunghezza d'onda di 1550nm settato a 0dBm di potenza in uscita, collegato ad una fibra a singolo mode SMF (*Single Mode Fiber* con distanza di collegamento di 30cm), una lente ottica collimatrice per l'accoppiamento della luce sul ponte FSO (3.7m) ed una lente di raccolta che concentra la luce su una SMF collegata ad un analizzatore di spettro ottico OSA (*Optical Spectrum Analyzer*) per la caratterizzazione spettrale e misura di potenza del segnale ricevuto. Lungo la distanza del collegamento sono state distribuite le varie perturbazioni prese in considerazione (fig. 17).

Figura 15. Set-up FSO con camera climatiche separate: condizioni perturbative medio-forti [18]

Figura 16. Set-up FSO nei laboratori ISCOM



Le perturbazioni sono state caratterizzate e misurate; in figura 15 sono riportati gli andamenti oscillatori del collegamento ottico da parte a parte nelle seguenti configurazioni: *link* imperturbato (fig.18a), *link* affetto da irraggiamento di calore (fig.18b), *link* soggetto a flusso d'aria fredda (fig.18c) e *link* soggetto a flusso d'aria calda (fig.18d).

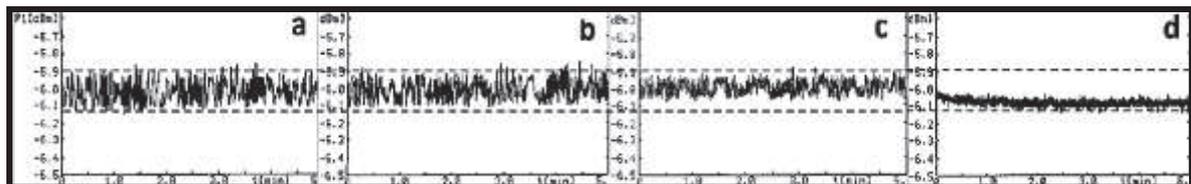


Figura 17. Schema del set-up FSO nei laboratori ISCOM: prospetto perturbativo

Figura 18. Configurazioni del prospetto perturbativo: 18a link imperturbato, 18b link affetto da irraggiamento di calore, 18c link soggetto a flusso d'aria fredda e 18d soggetto a flusso d'aria calda

Il collegamento ottico in condizioni standard, cioè senza turbolenze, è stato ottimizzato in termini di perdita minima di potenza ottica, con una potenza del segnale ricevuto a -5,7 dBm; mediante l'uso di ottiche adeguate, come ad esempio le ottiche ad indice di rifrazione graduato GRIN (Graded Index Optics), sono sicuramente possibili dei miglioramenti in termini di guadagno. Sviluppi futuri prevedono appunto meccaniche e ottiche migliori.

Il primo caso di osservazione riguarda l'effetto delle singole turbolenze; come mostrato in figura 18 la turbolenza del flusso d'aria calda è la sola a portare ad una riduzione della potenza media del segnale di 0,1dB, insieme ad una forte riduzione della variazione tempo-potenza del segnale stesso.

Il secondo caso è volto all'influenza della potenza del singolo flusso d'aria calda a due potenze scelte arbitrariamente diverse (fig. 19).

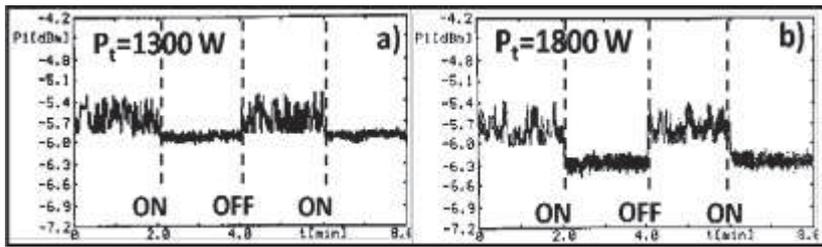


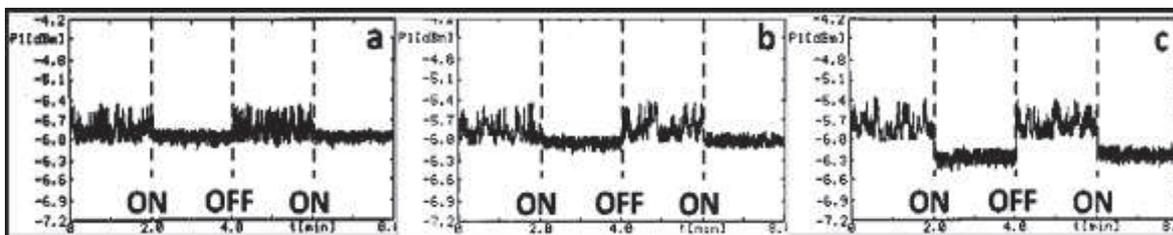
Figura 19. Potenza del segnale sotto effetto di flusso di aria calda con potenza nominale a 1300 W (a) e 1800 W (b)

La maggiore fonte di turbolenza con potenza nominale di 1800W, ha comportato sia la temperatura dall'aria più alta registrata, sia il movimento più veloce della massa d'aria stessa sul collegamento FSO. Queste caratteristiche inducono di conseguenza la massima perdita ottica (-0,5dB). La turbolenza è mostrata in figura 19 nei momenti di accensione (ON) e spegnimento (OFF); l'effetto deterministico delle turbolenze sul link è quindi osservabile con la risposta immediata all'attivazione del dispositivo e con la piena ripetibilità del comportamento in potenza del segnale alla riattivazione. Questa analisi fornisce la condizione preliminare per la solidità dei risultati ottenuti.

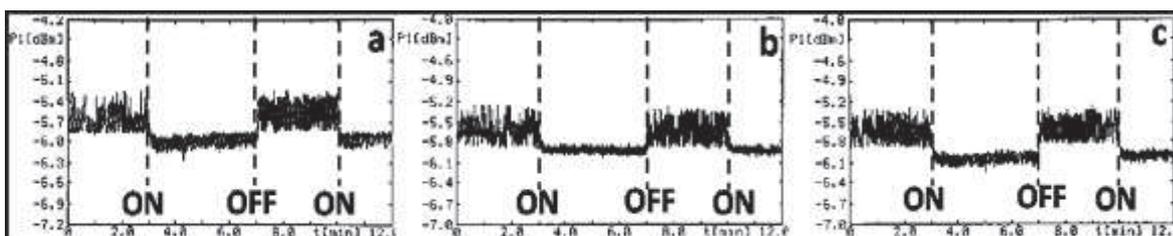
Figura 20. Potenza del segnale sotto effetto di flusso di aria calda a diverse posizioni lungo il cammino ottico a) più vicino al segmento di trasmissione (1 m di distanza), b) al centro del collegamento FSO (1,85 m di distanza), c) più vicino al tratto di ricezione (2,7 m di distanza).

Il terzo caso di osservazione riguarda la posizione relativa della turbolenza lungo il collegamento; la figura 20 mostra che la perdita di potenza del segnale aumenta quando la turbolenza è più vicina al ricevitore (-0.45 dB) rispetto alle altre posizioni (-0.2 dB a 1 m di distanza e -0.25 dB in posizione centrale).

Figura 21. Potenza del segnale sotto effetto di flusso d'aria calda con differenti posizioni relative al cammino ottico e potenza nominale: a) 1800 W in posizione A e 1300W in B e C, b) 1300 W in A e C, e 1800 W in posizione B, c) 1300 W nelle posizioni A e B, 1800 W in posizione C. Posizione A = 1 m di distanza dalla sezione di trasmissione, B posizione = 1,85m e C = 2,7 m di distanza

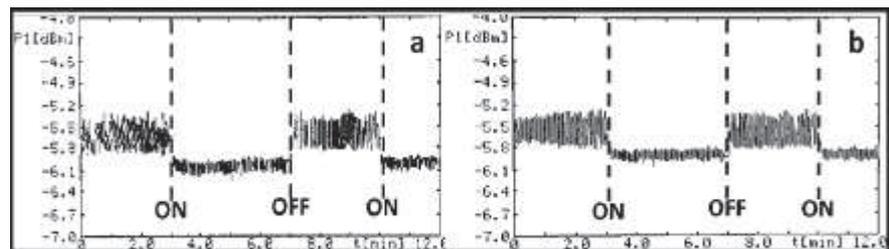


La figura 21 mostra l'andamento del segnale di alimentazione sotto l'effetto di una serie di tre flussi di aria calda (la cui potenza nominale è di 1300 W per due delle sorgenti e 1800W per una singola) in combinazioni di posizioni relative lungo il collegamento.



L'esperimento risultante in una combinazione dei risultati delle figure precedenti, ha fornito la massima perdita ottica di -0,5 dB quando la sorgente più potente è posizionato più vicino alla sezione di ricezione. Questo perché dove il fascio è più lontano, è anche più soggetto a lievi variazioni, essendo meno penetrante.

Il quarto caso infine è stato realizzato con la combinazione della matrice di tre sorgenti di flusso d'aria calda miscelati con una quarta fonte di aria fredda, con lo scopo di riprodurre un vortice d'aria vicino al collegamento FSO (fig. 22)



Come mostrato in figura 22, la perdita di potenza dei flussi combinati è inferiore alla singole d'aria calda (-0,45dB).

È stato inoltre effettuato il trasferimento di un video in *streaming* che ha fornito risultati simili in termini di perdita di pacchetti di informazione lungo il cammino FSO ed accoppiamento in fibra; sono stati persi solo 35 pacchetti nel link completo in fibra e 26 nel collegamento ibrido FSO-fibra, su un intero volume di oltre $8,0 \times 10^6$ pacchetti trasferiti. Quando è stata applicata la peggiore delle situazioni in termini di perdita di potenza indotta, cioè la matrice di sorgenti d'aria calda mostrato in figura 22, i pacchetti persi sono stati 163. Tale valore può essere considerato trascurabile rispetto al volume complessivo di pacchetti trasferiti.

9. Conclusioni

I risultati riportati, sebbene di ampia panoramica, forniscono spunti interessanti circa la possibilità di utilizzare tecnologie wireless ottiche in ambienti DC (*Data Center*), ma anche più in generale per soluzioni di rete *indoor* e *outdoor* di vario tipo. È stato dimostrato il potenziale significativo che l'FSO (*Free Space Optics*) possiede, in termini di maggiore capacità di banda e affidabilità nel trasporto dell'informazione; tale tecnologia infatti è attualmente ancora sottovalutata, ma potrebbe diventare un caposaldo per una gamma molto ampia di applicazioni e per l'elettronica del futuro. Ulteriori studi sono in fase di sviluppo in quanto sono necessarie aggiuntive analisi per consentire una valutazione quantitativa e qualitativa dell'impatto delle turbolenze sul link FSO in uno scenario DC; questa fase includerà un monitoraggio più profondo delle condizioni di collegamento in termini di temperatura locale durante gli esperimenti e l'utilizzo di fonti di calore e ventilazione più verosimili a quelli realmente presenti in un DC, quali ad esempio le ventole di raffreddamento interne ai *server* che

Figura 22. Potenza del segnale al punto a) più flussi d'aria calda e b) flussi di aria calda combinati ad un flusso di aria fredda

insieme al condizionamento dell'ambiente stesso, contribuiscono al generarsi di forti turbolenze. Inoltre, si sta lavorando sull'estensione del collegamento ottico sull'ordine di 5-10 metri che è appunto la distanza di interconnessione minima tra un *rack* e l'altro, perseguendo l'ottimizzazione del collegamento in termini di perdita di potenza minima, per mezzo di ottiche più performanti e adeguate; è anch'esso, un passaggio da considerare volto alla sperimentazione in condizioni più vicine allo scenario reale del DC.

Questo lavoro di ricerca è finanziato e supportato dai laboratori ISCOM presso il Ministero dello Sviluppo Economico in Roma e dall'Università di Roma, "Tor Vergata".

Bibliografia.

- [1] *Capacity Optimization with Discrete Multitone Modulation for Indoor Optical Wireless Communication System*, C. W. Oh, M. Bech, K. A. Mekonnen, E. Tangdiongga and A. M. J. Koonen, COBRA Research Institute, Eindhoven Univ. of Technology, P.O. Box 513, 5600MB Eindhoven, The Netherlands
- [2] *Patch Panels in the Sky a case for FSO in DC*, Navid Hamedazimi, Himanshu Gupta, Vyas Sekar, Samir R. Das, Department of Computer Science, Stony Brook University, Stony Brook NY, USA
- [3] *Free Space Optical Data Center Architecture Design with Fully Connected Racks*, Abdelbaset S. Hamza University of Nebraska-Lincoln, Jitender S. Deogun University of Nebraska-Lincoln, Dennis R. Alexander University of Nebraska-Lincoln
- [4] *Improving Data Center Efficiency with Rack or Row Cooling Devices: Results of "Chill-Off 2" Comparative Testing*, U.S. Department of Energy, FEDERAL ENERGY MANAGEMENT PROGRAM
- [5] *FireFly: A Reconfigurable Wireless Data Center Fabric Using Free-Space Optics*, Navid Hamedazimi, Zafar Qazi, Himanshu Gupta, Vyas Sekar, Samir R. Das, Jon P. Longtin, Himanshu Shah, and Ashish Tanwery, Stony Brook University, Carnegie Mellon University
- [6] *Assisted Focus Adjustment for Free Space Optics, System Coupling Single-Mode Optical Fibers*, Koichi Yoshida, Kuniaki Tanaka, Takeshi Tsujimura, and Yuji Azuma
- [7] *Trans-Window Free Space Optics Transmission System*, Takeshi Tsujimura, Koichi Yoshida, Toshio Kurashima, and Masahiko Mikawa
- [8] *1.28-Tb/s (32 40 Gb/s) Free-Space Optical WDM Transmission System*, E. Ciaramella, Y. Arimoto, G. Contestabile, M. Presi, A. D'Errico, V. Guarino, and M. Matsumoto
- [9] *Free Space Optical Data Center Architecture Design with Fully Connected Racks*, Abdelbaset S. Hamza, Jitender S. Deogun, Dennis R. Alexander, Electrical Engineering Department University of Nebraska-Lincoln
- [10] *Calculating Total Cooling Requirements for Data Centers* by Neil Rasmussen, Schneider Electric
- [11] *Experimental and Analytical Investigation of the Transient Thermal Response of Air Cooled Data Centers*, Hamza Salih Erden, Syracuse University
- [12] www.dchuddle.com/2011/crac-v-crah/
- [13] *Data Center Power and Cooling*, CISCO, White Paper, August, 2011
- [14] *Data center technology, Guidelines for Assessing Power and Cooling Requirements in the Data Center*, DELL, Power Solutions, August 2005

- [15] *The Advantages of Row and Rack-Oriented Cooling Architectures for Data Centers*, Kevin Dunlap, Neil Rasmussen, APC, White Paper #130
- [16] *CFD Modeling of an Air-Cooled Data Center*, Master's thesis in Applied Mechanics, EMELIE WIBRON, Department of Applied Mechanics CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY Gothenburg, Sweden 2015
- [17] *Optical wireless communications: system and channel modelling with MATLAB* (CRC Press, Boca Raton, FL, 2012), Ghassemlooy, Z., Popoola, W., Rajbhandari, S.
- [18] *Indoor free space optics link under the weak turbulence regime: measurements and model validation*, Riccardo Pernice, Andrea Andò, Marzia Cardinale, Luciano Curcio, Salvatore Stivala, Antonino Parisi, Alessandro C. Busacca¹, Z. Ghassemlooy, Joaquin Perez, IET Commun., 2015, Vol. 9, Iss. 1, pp. 62–70
- [19] *Experimental verification of an all-optical dual-hop 10 Gbit/s free-space optics link under turbulence regimes*, Jiri Libich, Matej Komanec, Stanislav Zvanovec, Petr Pesek, Wasiu O. Popoola and Zabih Ghassemlooy, February 1, 2015 / Vol. 40, No. 3 / OPTICS LETTERS 391
- [20] *Investigation of Moderate-to-Strong Turbulence Effects on Free Space Optics - A Laboratory Demonstration*, Norhanis Aida Mohd Nor, Elizabeth Fabiyi, Mojtaba Mansour Abadi, Xuan Tang, Zabih Ghassemlooy, Andrew Burton