Gianpaolo Susanna, Vincenzo Attanasio, Silvia Di Bartolo, Luigi Salamandra, Angelo Pizzoleo, Domenico Carleo
(Istituto Superiore delle Comunicazioni e delle Tecnologie dell'Informazione)

(Università degli Studi di Roma "Tor Vergata", Dipartimento di Ingegneria Elettronica)

Valentina Lucli
(Università degli Studi di Roma "Tor Vergata", Dipartimento di Ingegneria Elettronica)

Influenza meteorologica sui sistemi di trasmissione in spazio libero "Free Space Optics" (FSO)

Weather influence on Free Space Optics (FSO) transmission systems

Sommario: *Nell'ambito delle telecomunicazioni, la crescita esponenziale delle infrastrutture e delle tecnologie ad oggi presenti, ha portato inesorabilmente ad una estrema necessità di reti di comunicazione adeguate, soprattutto a causa del crescente numero di persone che popolano le città. L'approssimarsi della commercializzazione dei nuovi dispositivi di rete 5G, crea l'esigenza della creazione di una infrastruttura di rete a supporto dell'interfaccia radiomobile che presenti adeguate caratteristiche in termini di capacità, latenza, risparmio energetico, etc. Risulta quindi sempre più mandatorio l'apporto di tecnologie che supportino la richiesta di una banda sempre più ampia per la fornitura di servizi e per lo smistamento dei dati. In questo articolo viene trattata una tecnologia laser che sta emergendo negli ultimi anni, in parte presente sul mercato, ma ancora in fase di esplorazione in ambito di ricerca per le possibili applicazioni. Nei laboratori di comunicazioni ottiche dell'Istituto Superiore delle Comunicazioni e delle Tecnologie dell'Informazione viene effettuato questo tipo di ricerca su sistemi di trasmissione ottici in aria senza necessità di guide d'onda, denominato Free Space Optics (FSO). La funzionalità e l'utilità di questi sistemi è già stata ampiamente discussa e dimostrata in precedenti articoli; di seguito vengono indagate le questioni legate all'influenza dei fattori ambientali sul link ottico, che impattano pesantemente sulla qualità del collegamento, analizzate con l'ausilio di una stazione meteo collegata al set-up FSO. Viene quindi discussa l'influenza delle variabili legate al tempo atmosferico e dimostrata la stabilità di tali sistemi anche quando perturbati, a meno di condizioni che portano ad oscuramento totale (anche se al più queste ultime, risultano essere passeggere e di breve durata).*

Abstract: *In the field of telecommunication, the exponential growth of the infrastructures and technologies to date, have inexorably led to an extreme need for adequate communication networks, mainly due to the growing number of people that populate the cities. The contribution of technologies that support the demand for an increasingly broadband for the provision of services and for the sorting of data is therefore increasingly mandatory. This article deals with the topic of a laser technology emerging in recent years, technology already partially present on the market, but still under exploration in the field of research of possible applications. In the laboratories of the Ministry of the*

Economic Development, this type of research is carried out on optical transmission systems in air without the need for waveguides, called Free Space Optics (FSO); the functionality and usefulness of these systems has already been widely discussed and demonstrated in the previous papers. In this work, the issues related to the influence of environmental factors on the optical link are investigated, impacting heavily on the link quality, analyzed with the aid of a weather station connected to the FSO set-up. The influence of the variables related to the weather is then discussed and the stability of these systems is demonstrated even when perturbed, unless conditions that lead to total obscuration (even if at most the latter are transient and of short duration).

1. Introduzione

La nascita di servizi ICT di nuova generazione, quali ad esempio *Video Streaming* e *Cloud Storage*, insieme alla crescita esponenziale degli utenti ed alla possibilità di avere più dispositivi per singola persona, determinano un continuo aumento della richiesta di banda. Molti dei servizi di nuova generazione richiedono inoltre una connessione sempre attiva e quindi una copertura di rete pervasiva. Le tecnologie basate sull'utilizzo della fibra ottica ben si prestano a fornire la capacità di canale richiesta, nonché a soddisfare le necessità future. Le reti ottiche d'accesso proposte negli anni passati spaziano dalle reti punto-punto (*Point-to-Point*, PtP), alle reti ottiche attive (*Active Optical Network*, AON), fino a quelle passive (*Passive Optical Network*, PON). Le AON fanno uso di apparati elettricamente alimentati (attivi appunto), quali *router* e *switch*, mentre le PON gestiscono il segnale ottico all'interno della rete utilizzando ripartitori ottici (*splitter*) puramente passivi. Le PON sono quelle che suscitano più interesse, in quanto flessibili e particolarmente adatte all'uso nelle reti d'accesso metropolitane. La rete di accesso di nuova generazione (*Next Generation Access Networks*) dovrà essere in grado di fornire una singola architettura adattabile a servizi multipli, con *bitrate* e modulazioni differenti, mantenendo al contempo i consumi energetici più bassi possibili. La PON è attualmente l'architettura di riferimento che permette di soddisfare i requisiti di queste nuove reti di accesso, in quanto presenta dei costi di messa in esercizio (*capex*) molto più bassi rispetto alle altre tipologie; le attuali politiche messe in atto dal Governo permettono di affrontare i costi molto elevati da sostenere per l'installazione capillare delle fibre ottiche portando l'Italia ad essere in linea con i tempi di sviluppo delle tecnologie di futura generazione. Il tratto di rete cosiddetto verticale, dalla prossimità dell'edificio alla borchia d'utente, essendo la proprietà di natura privata, rimane scoperto da questa azione. Diverse sono le tecnologie che si stanno mettendo in campo per sostenere la capacità di rete offerta dalla fibra e raggiungere gli utenti nei loro appartamenti con connessioni ad elevato bit rate. Tra queste *XG.fast* promette *bitrate* oltre il Gigabit al secondo su distanze inferiori ai cento metri.

Una soluzione possibile per ovviare agli elevati costi di cablaggio o per raggiungere zone in cui è difficile realizzare opere civili (scavi, posa pali, etc.) può essere invece rappresentata da una rete ibrida cablata-wireless, in cui l'ottica in spazio libero, *Free Space Optics* (FSO), si sostituisce al collegamento cablato tra due punti di interesse, permettendo, laddove possibile, di abbattere i costi di messa in esercizio. Il sistema FSO è già una realtà presente in commercio anche se, per ora, ricopre solo applicazioni in piccoli settori all'avanguardia; i motivi per i quali non vi è ancora diffusione di tale tecnologia sono soprattutto le questioni legate al mezzo di propagazione in cui viene inserito e le perturbazioni che appunto, a seconda del mezzo, questa va incontro. Il sistema FSO infatti ha un potenziale di applicabilità molto esteso, praticamente in tutte quelle condizioni in cui la luce è propagabile e quindi in ambienti aperti e chiusi (aria), scenari subacquei (acqua) e spazi extraterrestri (vuoto) per applicazioni satellitari ad esempio; risulta quindi necessario uno studio sulle influenze che il segnale FSO riceve durante la trasmissione in questi ambienti. In spazi chiusi (*indoor*) l'applicabilità risulta molto più semplice in quanto la staticità del mezzo non va a perturbare la propagazione, a meno di forti variazioni dovute al tipo di contesto; ad esempio in un precedente lavoro [1] è stata investigata e dimostrata l'applicazione di tale tecnologia in ambienti data center, grandi sale di server dedicati alla gestione ed allo smistamento dei dati, in cui a seconda dei casi vi possono essere cause di diversa natura che hanno ripercussioni sulla trasmissione [1]. Risulta invece assai più oneroso lo studio a riguardo dell'applicabilità in spazi aperti (*outdoor*), essendo molteplici le variabili climatiche in gioco. Il presente articolo si focalizza appunto sul comportamento dei sistemi FSO nelle suddette condizioni, quando appunto esposti al variare delle condizioni atmosferiche ed all'azione degli agenti climatici.

2. Il sistema FSO outdoor

Per *Free Space Optics* (FSO), ovvero "comunicazioni ottiche in spazio libero", si intende la trasmissione di segnali tra due punti a formare un ponte ottico, effettuata tramite l'utilizzo di una sorgente luminosa, tipicamente laser. Il sistema FSO opera a lunghezze d'onda comprese tra 780-1600nm (tipiche delle telecomunicazioni in fibra), ed attualmente può trasportare dati, voce e video ad una velocità fino a 2.5Gbps [2-7] e 128Gbps a tecnologia ibrida, ovvero sfruttando le risorse e componentistiche di altre tecnologie (es. fibra ottica) [3]; inoltre, alcuni lavori presenti in letteratura, ognuno con un diverso setup sperimentale, hanno raggiunto velocità dell'ordine dei Tbps [4-5].

Un sistema FSO si compone fondamentalmente di tre blocchi: trasmettitore, canale atmosferico e ricevitore. Il link FSO deve essere realizzato in linea di vista (*Line of Sight*, LOS), ovvero in modo che il trasmettitore ed il ricevitore si vedano direttamente, senza la presenza di ostacoli interposta. Per la tecnologia FSO, questo rappresenta forse l'unico importante svantaggio, ma risulta anche un punto a favore,

laddove, ad esempio, vi siano necessità e problemi di sicurezza informatica, in quanto il segnale per poter essere catturato, deve venire interrotto o deviato; di conseguenza è immediatamente rilevabile la falla di sicurezza. Viceversa, nei sistemi a radiofrequenze non vi è possibilità di sapere chi altro stia "captando" il segnale trasmesso, essendo questo propagato in tutto l'ambiente circostante.

Il trasmettitore è costituito da un laser, il che permette collegamenti a grande distanza e ed alta velocità. I collegamenti tipici coprono distanze tra 300m e 5km, ma è possibile spingersi fino a 8÷11km [3]. Rispetto ad un sistema a radio frequenza convenzionale, il sistema FSO presenta numerosi vantaggi che scaturiscono dalle alte frequenze utilizzate (nell'ordine dei THz), disponendo di un ampio spettro di lunghezze d'onda che vanno dai 780nm (vicino infrarosso, *near-IR*) ai 1600nm (infrarosso, *IR*) senza considerare anche la possibilità di trasmettere nel visibile (*Vis* 390÷700nm) il quale però soffre di attenuazioni maggiori [6]. Gli spettri utilizzati inoltre non sono licenziati e cioè non vi sono restrizioni al momento, sull'uso di tali bande di frequenze che interessano la luce visibile ed infrarossa appunto, a differenza invece della banda radio che è ormai satura di trasmissioni.

L'FSO grazie a tali spettri, permette alti *bitrate* di trasferimento superiori ai 100Gbps cosa impossibile con le radiofrequenze; sono stati dimostrati in letteratura 128Gbps di trasferimento su 11Km con tecnologia FSO ibrida [3]. Essendo fuori dallo spettro di interesse delle radiofrequenze, l'FSO presenta un'immunità alle interferenze elettromagnetiche ed essendo il link ottico di una precisione nanometrica, non vi è rischio di *crosstalking* o interferenze di altro genere.

Parlando dei costi invece, questi sono notevolmente ridotti; difatti essendo un link in aria (o più in generale in un mezzo trasparente), non sono necessari i costi dovuti a scavi per interrare linee fisiche che invece risultano essere molto costosi. Questo è anche un vantaggio notevole rispetto alla fibra ottica insieme con il basso BER (*Bit Error* Rate) e la bassa latenza; infatti la luce risulta essere 1.5 volte più veloce in aria che in fibra (la velocità *v*, viene calcolata come *c* velocità della luce*/n*).

Le dimensioni di un sistema FSO sono decisamente ridotte; le testine laser di per sé, sono molto piccole, ma anche considerando la struttura che le contiene insieme con il resto della componentistica, il tutto risulta essere di dimensioni minori rispetto alle antenne a radiofrequenza. L'ingombro generale, dato dall'elettronica circostante di alimentazione e fotorilevazione per il puntamento e dell'involucro di incapsulamento, è meno voluminoso rispetto ad altri sistemi convenzionali, arrivando a dimensioni non oltre quelle di un "piede" cubo (circa $33cm^3$). Questo ne comporta facilità e velocità di installazione, che è un aspetto molto importante soprattutto se si pensa a situazioni di *disaster recovery* (terremoti, alluvioni, ecc.) dove vi è necessita di installare link temporanei, efficienti ed a bassa manutenzione in poco tempo.

C'è da discutere però, anche di alcuni svantaggi che i sistemi FSO presentano; essenzialmente due. Il primo è dovuto all'alta direttività del fascio trasmesso, che rende molto difficile l'acquisizione ed il puntamento del laser, ma questo è vero solo per sistemi FSO passivi non

dotati di elettronica aggiuntiva; gli apparati presenti in commercio, infatti, possiedono elementi atti alla conversione elettro-ottica che rendono fattibile l'auto-puntamento ed allineamento, ovviando così a questo problema. Rimane quindi l'altro dei due principali problemi e cioè la sensibilità a fattori atmosferici quali caligine, nebbia, pioggia e turbolenza, che sono appunto argomento del presente articolo.

3. Applicazioni FSO

Le applicazioni pratiche dei sistemi FSO sono innumerevoli, e riguardano i più svariati ambiti, da quello militare a quello satellitare. Nelle applicazioni militari le comunicazioni ottiche in spazio libero permettono di espandere la connettività all'interno delle basi militari, mantenendo al contempo gli standard di sicurezza necessari ed abbattendo i costi legati alle connessioni in fibra; i sistemi FSO si rivelano preziosi soprattutto nel caso in cui la base militare si trovi su terreni impervi ed ostili, essendo spesso campi provvisori (fig. 1a). Nelle applicazioni di tipo WSP (W*ireless Service Provider*), i sistemi FSO possono essere utilizzati per permettere le comunicazioni wireless in gallerie, aree shopping e/o sotterranee e metropolitane (fig. 1b). La facilità di implementazione dei link FSO permette inoltre il loro utilizzo in ambiti per la connettività d'impresa, per la connessione dei segmenti di LAN ubicati in edifici distinti e li rende particolarmente utili nel caso in cui il sito presso il quale sono installati, debba essere spostato (fig. 1c).

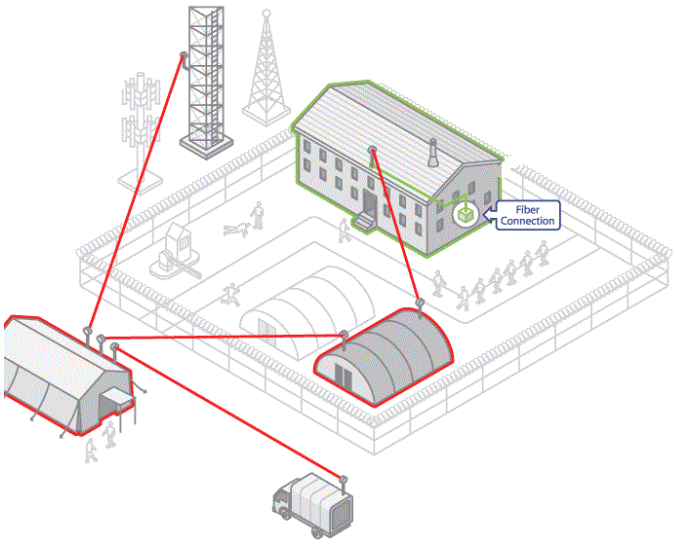

Figura 1a. *Alcuni esempi di applicazioni di link FSO: militari.*

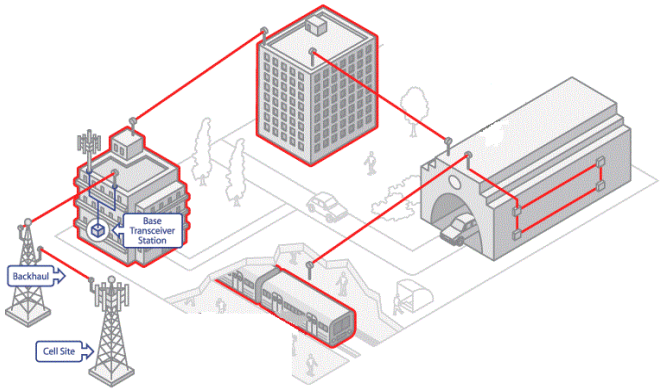

Figura 1b. *Alcuni esempi di applicazioni di link FSO: WSP.*

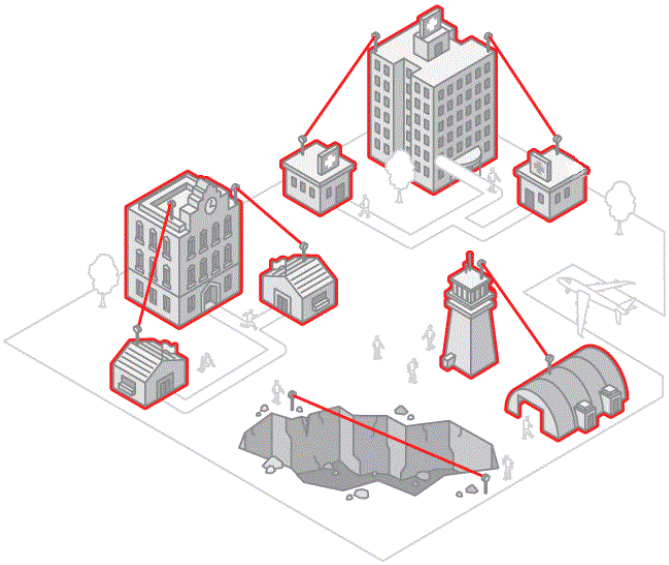

Figura 1c. *Alcuni esempi di applicazioni di link FSO: Connettività d'impresa.*

I collegamenti FSO possono essere utilizzati per risolvere il problema dell'"ultimo miglio", ovvero il calo di risorse che si ha nella rete di accesso; i sistemi FSO, infatti, si prestano all'integrazione con la fibra ottica e possono quindi fornire un collegamento ad alta velocità alle abitazioni non raggiunte direttamente dalla fibra. Sempre in ambito terrestre, un esempio eclatante delle potenzialità dei sistemi ottici in spazio libero è costituito dal drone "Aquila", progettato da Facebook (fig. 2); questo drone ha le dimensioni di un Boeing 737 (come apertura alare), è provvisto di pannelli solari, ed in grado di volare ad un'altezza di 27.000 metri. L'utilizzo di questo drone, è volto a fornire la connettività a banda larga in zone abitative "rurali" dove le tradizionali infrastrutture di rete non possono arrivare (per difficoltà oggettive di realizzazione, o semplicemente per i costi proibitivi). Il cuore del sistema di collegamento è proprio basato sulla tecnologia FSO, tramite una serie di laser che comunicano a terra con dei ricevitori, raggiungendo velocità fino a 10 Gbit/s.

Figura 2. *Il drone di Facebook "Aquila"*

In ambito satellitare è noto che le comunicazioni richiedano lo scambio di una grande mole di dati ad elevate velocità; i sistemi FSO, data l'elevata direzionalità dei fasci ottici e l'elevato *bitrate* ben si prestano ad essere usati in applicazioni di questo tipo. Un esempio attuale è l'uso dei sistemi FSO per i collegamenti nello spazio profondo e per le comunicazioni tra stazioni base e satelliti geo-stazionari.

4. Fenomeni atmosferici e criteri di valutazione di interesse in un sistema FSO

L'attenuazione atmosferica rappresenta una delle maggiori sfide per il canale FSO, in quanto può portare a perdite di segnale, o peggio al "crollo" del collegamento. L'atmosfera, infatti, non provoca solo un effetto di attenuazione del segnale, ma per via delle varie dimensioni delle particelle presenti nella stessa, e quindi vari cambi di indici di rifrazione, si verificano vere e proprie deviazioni del fascio laser. I principali fenomeni atmosferici che influenzano le prestazioni di un canale ottico sono:

- Nebbia e foschia: idrometeore che si formano dal vapore acqueo, che condensandosi formano delle piccolissime gocce d'acqua (5-10µm di diametro). Si parla di nebbia nel caso in cui la visibilità sia inferiore ai 1000m e di foschia se la visibilità è tra i 1000 ed i 5000m; la formazione di queste avviene in caso di umidità relativa della massa d'aria del 100%.
- Fumo: dispersione di particelle solide, solitamente di diametro inferiore a 2µm, risultante dalla condensazione del vapore che scaturisce da reazioni chimiche (quali, ad esempio, la combustione).

- Neve: acqua ghiacciata cristallina, formata da una moltitudine di minuscoli cristalli di ghiaccio, tutti aventi di base una simmetria esagonale, aggregati tra loro in maniera casuale a formare fiocchi di neve che vanno dal 1 ai 5mm di dimensioni.
- Caligine: fenomeno atmosferico in cui polvere, fumo ed altre particelle secche oscurano la limpidezza del cielo.
- Pioggia: insieme di goccioline d'acqua in atmosfera, variabili in numero e forma nel tempo e nello spazio. La forma di queste particelle dipende dalla loro dimensione: sono considerate sfere fino ad un raggio di 1 mm; oltre il mm sono considerate sferoidi oblati.
- Aerosol: sospensione in un gas di particelle di piccole dimensioni, liquide o solide generalmente di diametro inferiore ad 1µm. Gli aerosol sono diversi in natura, forma, dimensioni e concentrazione; data la variabilità di tali particelle, l'interazione tra aerosol e luce può avere una dinamica piuttosto ampia, in termini di lunghezze d'onda ed "importanza" del fenomeno di *scattering*. Poiché gli aerosol hanno origine sulla superficie terrestre, essi raggiungono la maggior concentrazione nello strato limite planetario dell'atmosfera (uno strato fino a 2km sopra la superficie terreste) e decrescono rapidamente al di sopra di esso. A quote più elevate, a causa delle attività atmosferiche e dell'azione combinata dei venti, la concentrazione di aerosol diventa spazialmente uniforme e più indipendente dalla collocazione geografica. L'interazione principale tra aerosol e raggio laser è rappresentata dallo *scattering*, il quale, data la dimensione delle particelle comparabile alle lunghezze d'onda d'interesse nelle comunicazioni ottiche, è descritto matematicamente dalla teoria dello *scattering* di Mie [8]. Secondo tale teoria il coefficiente di *scattering* degli aerosol è funzione della loro distribuzione dimensionale, sezione trasversa, densità e lunghezza d'onda "operativa".

In generale, l'insieme di tutte le particelle, solide o liquide, disperse in atmosfera, con diametro compreso tra qualche nanometro e decine/centinaia di micrometri, viene chiamato "particolato". Le dimensioni dei vari costituenti atmosferici e le relative concentrazioni sono riportate in Tabella 1 [9].

Tipo	**Raggio (μm)**	**Concentrazione (cm^{-3})**
Molecole d'Aria	10^{-4}	10^{19}
Aerosol	10^{-2}	da 10 a 10^{3}
Nebbia	da 1 a 10	da 10 a 100
Nuvole	da 1 a 10	da 100 a 300
Gocce di pioggia	da 10^{-4} a 10^{-2}	da 10^{-5} a 10^{-2}
Neve	da 10^{3} a $5x10^{3}$	N/A
Caligine	da $5x10^{3}$ a $5x10^{4}$	N/A

Tabella 1. Dimensioni e concentrazione dei costituenti atmosferici (particolato). I dati sono presi dallo studio condotto da X et al. [9].

Per la caratterizzazione del *link* ottico, in base ai fenomeni enunciati precedentemente, vi sono molteplici parametri d'interesse; questi risultano essere più o meno importanti a seconda dell'applicazione richiesta. Ad esempio, le condizioni cambiano su lungo o breve raggio a seconda della possibilità di potenze di emissione utilizzabili; di seguito verranno elencate e discusse le singole variabili da considerare per un *set-up* ottico FSO.

La **visibilità** è il primo dei parametri da considerare. In generale, è la misura della distanza alla quale un oggetto (o una luce) possono essere distinti chiaramente; dal punto di vista meteorologico, la visibilità è riferita alla trasparenza dell'aria, definita come portata ottica meteorologica MOR (*Metereological Optical Range*), ovvero la distanza atmosferica alla quale un oggetto di colore nero può essere visto e riconosciuto quando osservato contro uno sfondo chiaro oppure, analogamente, la distanza alla quale la potenza di riemissione luminosa (di un oggetto illuminato da un fascio collimato generato da una lampada ad incandescenza a 2700K), viene ridotta del 5% della sua intensità d'origine. La scarsa visibilità abbassa l'efficacia e la disponibilità dei sistemi FSO: tale condizione può verificarsi durante uno specifico periodo dell'anno o in specifici momenti della giornata. Si ha anche scarsa visibilità quando la concentrazione e la dimensione delle particelle è più alta rispetto alla visibilità media.

L'**attenuazione** atmosferica: è definita come quel processo per il quale la totalità o una parte delle onde elettromagnetiche viene persa nell'attraversamento dell'atmosfera. Sono diversi gli effetti che la determinano e sono variabili nel tempo, oltre ad essere dipendenti dalle condizioni locali e dalle condizioni metereologiche; in generale, l'attenuazione atmosferica è data dalla legge di Beer-Lambert [8] e viene misurata in dB/Km. Tra i fenomeni più importanti che causano attenuazione atmosferica ci sono l'assorbimento e lo *scattering*. L'assorbimento è causato dalle collisioni dei fotoni con particelle allo stato liquido o solido in aria (vapore acqueo, polvere, ghiaccio e

molecole organiche), a cui i fotoni cedono energia; il coefficiente di assorbimento dipende dal tipo di molecole gassose e dalla loro concentrazione. Dipende dalla lunghezza d'onda ed è perciò selettivo; per tale motivo l'atmosfera ha delle zone "trasparenti", ovvero dei *range* di lunghezze d'onda in cui l'assorbimento è minimo, chiamate "finestre" di trasmissione. Le lunghezze d'onda utilizzate in ambito FSO vengono fatte coincidere con queste finestre, ragion per cui il coefficiente di assorbimento è trascurabile ed il fenomeno di attenuazione è quindi principalmente dato dallo *scattering*. Lo *scattering* è la dispersione di un raggio in un insieme di direzioni in seguito all'interazione fisica tra particella ed onda elettromagnetica; nel momento in cui avviene l'interazione, i fotoni del fascio luminoso vengono deviati in ogni direzione, provocando la variazione della traiettoria del fascio incidente, che risulta quindi in una perdita del segnale utile, in quanto parte del fascio non riesce a raggiungere il ricevitore. Ci sono tre tipi principali di *scattering*: di Rayleigh, di Mie e "non selettivo". Il primo interessa gas molecolari e atmosferici di dimensioni molto minori rispetto alla lunghezza d'onda del raggio incidente. Ne risulta che lo *scattering* di Raylegh è trascurabile nell'infrarosso, mentre è significativo nelle bande dall'ultravioletto al visibile [11]. Lo *scattering* di Mie invece si ha nel caso in cui il diametro della particella sia uguale o maggiore di un decimo della lunghezza d'onda del raggio laser incidente; questo tipo di *scattering* interessa aerosol di dimensioni maggiori delle molecole di gas ed è la causa principale dell'attenuazione alle lunghezze d'onda d'interesse per le comunicazioni FSO. Lo *scattering* di Mie è perciò, il fenomeno da tenere maggiormente in conto quando si parla di ottica in spazio libero, in quanto l'attenuazione può raggiungere valori di centinaia di dB/km, le cui attenuazioni massime si hanno in presenza di nebbia; le particelle di nebbia sono infatti più piccole e permangono più a lungo nell'atmosfera causando un'attenuazione maggiore rispetto alla pioggia. Lo *scattering* dovuto alle piogge invece, viene denominato "non selettivo", poiché il raggio delle gocce (100-1000 µm) è molto maggiore rispetto alla lunghezza d'onda tipica di un sistema FSO; il raggio laser può quindi passare attraverso le particelle d'acqua. Le caratteristiche delle gocce di pioggia sono ben descritte dal modello di Best [12].

Tra le altre variabili vi sono poi le **turbolenze**; questo fenomeno influenza la propagazione del raggio ottico producendo una fluttuazione spaziale e temporale dell'indice di rifrazione, dovuta alle variazioni di temperatura, pressione e vento. La turbolenza atmosferica causa lo sfasamento del segnale ottico, ovvero la distorsione del fronte d'onda; tali aberrazioni ottiche causano anche distorsioni dell'intensità del segnale (fenomeni di scintillazione). Le variazioni di umidità, temperatura e pressione producono variazioni di densità, le quali portano alla variazione dell'indice di rifrazione in aria; tali variazioni vengono dette vortici ed hanno un effetto "lente" sul raggio che si propaga attraverso essi [12]. Se la dimensione dei vortici è maggiore del diametro del raggio, l'intero fascio del laser viene curvato; se invece la dimensione dei vortici è inferiore, il raggio viene distorto. Piccole variazioni nel tempo di arrivo dei vari componenti del fronte d'onda del

raggio producono interferenze costruttive e distruttive, che provocano fluttuazioni temporali dell'intensità del raggio in ricezione.

Se si considera, invece, l'atmosfera come un fluido viscoso si possono distinguere due diversi moti: il flusso laminare ed il flusso turbolento. Il flusso laminare è caratterizzato da uno scorrimento di strati di fluido gli uni sugli altri senza nessun rimescolamento; le caratteristiche della velocità del flusso laminare si mantengono quindi uniformi o variabili in maniera regolare. Nel caso del flusso turbolento, invece, il moto delle particelle di fluido avviene in maniera caotica, poiché le forze viscose non riescono a contrastare le forze d'inerzia e si creano quindi i cosiddetti vortici; per valutare se il flusso segue un regime di scorrimento laminare o turbolento si utilizza il numero di Reynolds, che risulta proporzionale al rapporto tra le forze d'inerzia e le forze viscose. Nel caso di regime laminare si avrà un numero di Reynolds alto, mentre nel caso di regime turbolento il numero di Reynold (*Re*) assumerà un valore più basso [6]. Per comprendere la struttura della turbolenza atmosferica è conveniente adottare la teoria della cascata di energia di Richardson, il quale ipotizza che in un fluido ad alto numero di Reynolds, i disturbi a piccola scala siano approssimativamente isotropi. Secondo la teoria di Richardson, un aumento del numero di Reynolds di un fluido in moto laminare provoca il passaggio al regime turbolento e la comparsa non simultanea di disturbi di diverse dimensioni (ordini). Nello specifico non appena *Re* supera il valore critico appaiono i disturbi a grande scala (disturbi del primo ordine), i quali, data la loro instabilità, generano disturbi del secondo ordine, che prelevano energia dai primi. A loro volta i disturbi del secondo ordine generano disturbi del terzo ordine e così via. Si viene quindi a creare una gerarchia in cui avviene un trasferimento di energia tra i disturbi a scala superiore a quelli a scala inferiore (cascata energetica), fino ad arrivare al punto in cui la viscosità trasforma tutta l'energia in calore. A partire dal concetto di cascata di energia di Richardson, Kolmogorov formula la prima teoria statistica della turbolenza, che permette di quantificare il fenomeno descritto qualitativamente da Richardson [13]. La teoria di Kolmogorov si applica alla turbolenza omogenea e isotropa, condizione di fatto irrealizzabile nei sistemi reali e che quindi costituisce un'astrazione concettuale volta alla semplificazione della trattazione teorica (si osserva comunque che tutti i sistemi reali sono localmente isotropi e omogenei).

La turbolenza ha in sé due effetti principali, quali la scintillazione e la diffusione del fascio. Per scintillazione del fascio si intende la variazione della densità di potenza ricevuta, causata dalle interferenze distruttive dei disturbi di piccola scala; la scintillazione è uno degli effetti da tenere in maggiore considerazione quando si parla di FSO. Le fluttuazioni di intensità della luce infatti, sono descritte dall'indice di scintillazione come la varianza normalizzata dell'intensità delle fluttuazioni [10]. La diffusione invece, descrive l'allargamento della dimensione del fascio a causa della diffrazione nell'atmosfera turbolenta [14]. In presenza di turbolenza atmosferica è bene descrivere le prestazioni di un collegamento FSO in termini di probabilità di "mancata rilevazione", la quale descrive la percentuale di tempo in cui l'irradianza dell'onda ricevuta si trova al di sotto della soglia prestabilita;

quindi, se il rapporto segnare rumore SNR (*Signal Noise Ratio*) nello spazio libero è sufficientemente alto, la probabilità di mancata rilevazione è determinata dai soli effetti atmosferici e viene espressa in funzione della soglia dell'irradianza [6].

Vi sono poi perdite dovute alla geometria definite come ***path-loss* geometrico**, che dipendono dalla larghezza del fascio (*beam-width*) del trasmettitore [15]. Le perdite geometriche devono sempre essere tenute in conto quando si parla di collegamenti FSO, in quanto tali perdite non sono variabili nel tempo come quelle provocate dall'attenuazione atmosferica, ma sono fisse per ogni specifico collegamento FSO.

Infine troviamo l'**attenuazione totale**, ovvero la somma di tutti i parametri suddetti considerati però ad alto livello.

5. Descrizione del setup FSO

Il sistema FSO è stato allestito su un banco ottico stabilizzato situato al piano terra del Ministero dello Sviluppo Economico di Roma, presso i laboratori dell'Istituto Superiore delle Comunicazioni e delle Tecnologie dell'Informazione (ISCTI), quale direzione del ministero stesso. In particolare, la stanza è dotata di una finestra che affaccia direttamente sul cortile interno dell'edificio; dirimpetto, ad una distanza di 40 metri circa, in un'altra stanza affacciata al medesimo cortile, vi è uno specchio, di diametro 6cm.

Tramite quest'ultimo, il percorso ottico totale in *back-to-back* (ovvero il segnale viene generato, trasmesso e ricevuto nella stessa stanza) risulta quindi essere di circa 80m, considerate anche le varie riflessioni all'interno delle stanze (fig. 3).

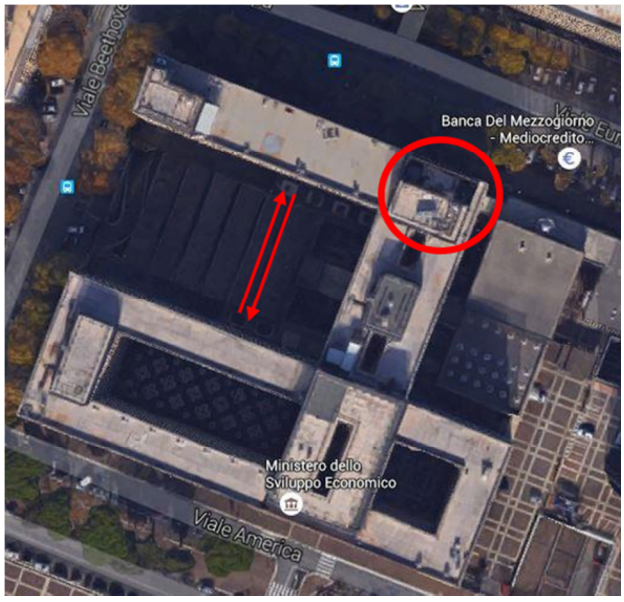

Figura 3a. Setup FSO: visuale dall'alto del percorso ottico e stazione meteo (cerchiata).

Figura 3b. Setup FSO: finestra su cortile.

Figura 3c. Setup FSO: banco ottico.

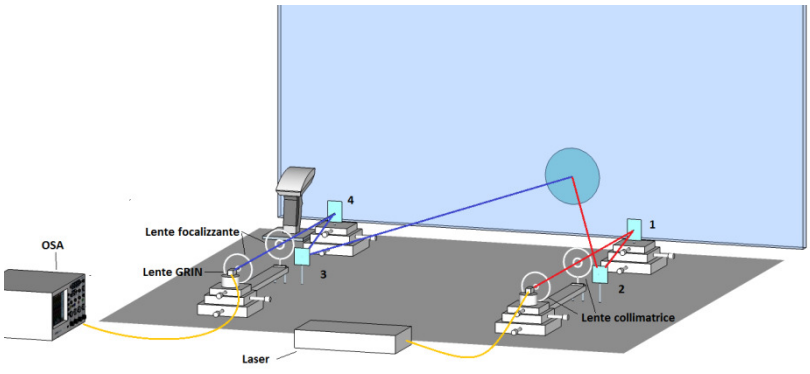

Figura 3d. Setup FSO: schema del setup sul banco ottico.

Il setup FSO in oggetto è di tipo completamente passivo, ovvero la sorgente laser viene trasportata in fibra e fatta emettere direttamente dalla fibra e riaccoppiata di ritorno in fibra (senza conversioni elettro-ottiche). Il setup è frutto dell'investigazione che è stata concordata di intraprendere; ovvero sono state individuate le grandezze significative da misurare e sono stati inseriti nei setup gli opportuni strumenti. Le grandezze in analisi sono elencate in seguito.

In Figura 3d viene riportato lo schema di principio del set-up FSO. Questo è diviso in sezione trasmittente e sezione ricevente che sono perfettamente simmetriche tra loro così da poter essere interscambiabili. Sulla parte trasmittente, a partire dalla terminazione della fibra, è posta una lente GRIN, ovvero una lente ad indice di rifrazione graduato che funziona in questo caso da *beam expander*, cioè permette di defocalizzare il fascio allargandolo; il raggio emesso dal laser quindi viene espanso dalla GRIN ed arriva su un'altra lente asferica (modello AL1020-C Thorlabs) che lo collima in un pacchetto simmetrico di fasci paralleli (le lenti collimatrici hanno quest funzione di rendere i raggi paralleli tra loro). A distanza di 30cm dalla prima lente collimatrice è posta una seconda lente collimatrice di diametro pari a 30mm. Il raggio incide quindi sullo specchio indicato in figura con il numero 1 e viene riflesso sullo specchio indicato con il numero 2. Quest'ultimo è orientato in modo tale che il raggio da esso riflesso attraversi la finestra chiusa ed incida sullo specchio che si trova al di là del cortile; questo riflette il raggio, che va ad incidere sullo specchio numero 3 e successivamente sullo specchio 4. Da questo punto parte la sezione ricevente; il raggio laser incide quindi su di una lenta focalizzante di diametro pari a 30 mm ed in seguito su di un'altra lente GRIN, che in questo caso è posizionata in modo tale da focalizzare il fascio in fibra; questa raggiunge quindi l'Optical Spectrum Analyzer (OSA), che fornisce la misura in potenza del segnale ricevuto. Completa il setup la termocamera (FLIR E50) che ha lo scopo di misurare la temperatura del vetro della finestra nella zona in cui attraversano i raggi diretto e riflesso; la termocamera misura inoltre la temperatura della meccanica del banco ottico. La termocamera è uno strumento che rileva la radiazione infrarossa (invisibile all'occhio umano) e la converte in un'immagine visibile. La radiazione infrarossa è emessa da ogni oggetto che si trovi ad una temperatura superiore allo zero assoluto ed aumenta in intensità con l'aumentare della temperatura. Una telecamera ad infrarossi calibrata è in grado di restituire le immagini termografiche dell'oggetto e di fornire misure in temperatura accurate senza la necessità di un contatto diretto. Tale strumento è dotato di puntatori che permettono di selezionare i punti o le aree di interesse e di uno spotmeter in grado di effettuare la misura della temperatura (massima, minima e media) nell'area selezionata. Il *range* di temperatura è selezionabile dall'utente.

Per poter utilizzare in modo efficiente il sistema FSO e quindi ridurre al minimo le perdite per disallineamento del sistema, è necessario ottimizzare il setup posizionando in modo opportuno gli specchi e le lenti.

6. Stazione meteo ed analisi dati

Il setup FSO è direttamente interfacciato, mediante piattaforme software, ad una stazione meteo situata sul terrazzo del Ministero (Fig.3a). Le strumentazioni utilizzate per la misura dei dati meteorologici sono molteplici, quali:

- **Anemometro** *Campbell Scientific* 05103-L: è uno strumento in grado di misurare velocità del vento comprese tra 0 e 100m/s, con un'accuratezza di ± 0.3m/s, e direzione del vento a 360°. La velocità del vento viene misurata mediante un'elica a quattro pale di forma elicoidale, la cui rotazione produce un segnale sinusoidale AC, con frequenza proporzionale alla velocità del vento. La direzione del vento, invece, viene ricavata dall'orientazione dell'anemometro; in uscita si ha una tensione che risulta direttamente proporzionale all'angolo di *azimuth*.

- **Pluviometro** *Sianmicros* a bascula con sensore SIAP UM 7505: è uno strumento per la misura dei parametri riguardanti le precipitazioni piovose. Il sensore è composto da un'area di raccolta di 720cm^2 e da una bascula a doppia vaschetta collegata ad un magnete che genera un impulso in uscita ad ogni commutazione.

- ***Combilog*** 1020 di Theodor Friedrichs & Co. con interfacce seriali (RS232 e RS485) che permettono la comunicazione via ASCII, PROFIBUS o MODBUS: gli strumenti fin qui descritti sono collegati a questo *datalogger* progettato appositamente per sistemi di misura meteorologici, idrologici e ambientali. È dotato di 8 canali di misura analogici e 6 digitali e supporta tutti i più comuni tipi di sensori, che possono essere connessi simultaneamente; lo strumento è in grado di calcolare valori medi, minimi, massimi, deviazione standard e altre funzioni aritmetiche collezionabili via software. I sei input/output digitali possono essere usati per raccogliere segnali di *feedback*, misurare frequenze o per ricevere segnali seriali in codice di *Gray* a 8 bit.

- **Disdrometro**-visibilimetro PWS100 (*Present Weather Sensor*) della Campbell Scientific: è uno strumento per stazioni meteorologiche in grado di misurare parametri di pioggia e visibilità. Il dispositivo può lavorare a temperature ambientali che vanno dai –25°C ai 50°C, in presenza di vento con velocità fino a 60m/s.

Il PWS100 è costituito da un'unità laser e due sensori posizionati ad angoli di 20° rispetto all'asse ottico del laser, di cui uno sul piano verticale e l'altro sul piano orizzontale; l'unità laser (Figura 2.8) è costituita da vari componenti ottici che permettono di creare una sorta di piano di luce.

Il laser opera ad una lunghezza d'onda di 830nm ed è modulato in frequenza a 96Hz. Questa struttura permette di definire un volume adatto a rivelare particelle di varie dimensioni, costituito da quattro piani di luce di 0.4mm di profondità ed equi-spaziatura. Quando una particella attraversa l'area di rivelazione emette un segnale dal quale è possibile ricavare la natura del fenomeno in atto; la velocità delle particelle viene ricavata calcolando il tempo che intercorre tra due picchi di segnale consecutivi. Il diametro invece è calcolato combinando le

informazioni sulla velocità con il ritardo che intercorre tra la rivelazione del picco da parte dei due sensori.

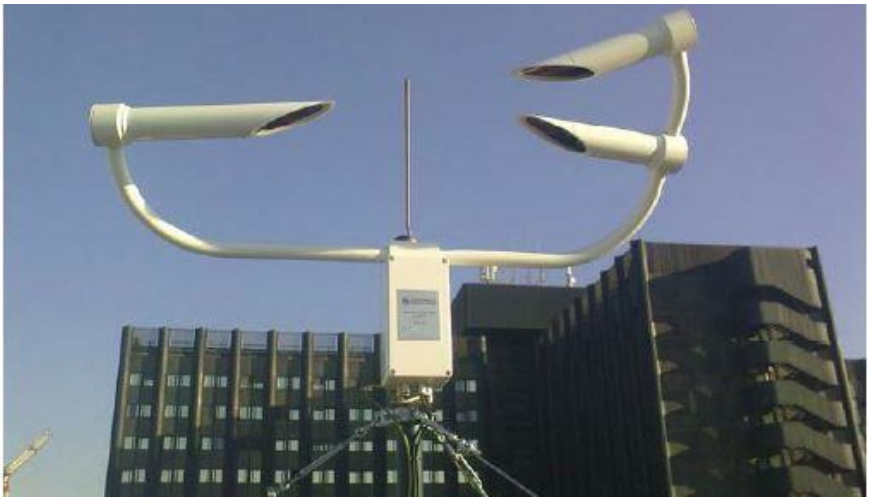

Figura 4. Disdrometro-visibilimetro

La visibilità viene misurata mediante tecniche di *scattering* che permettono di stimare il *range* ottico meteorologico (MOR). La quantità di particelle scatterate in corrispondenza dei sensori è proporzionale alla visibilità per quanto concerne le piccole particelle di nebbia. Nel caso in cui le particelle siano di dimensioni maggiori (come pioggia ad esempio), il PWS100 stima la visibilità utilizzando come fattore di calibrazione la propria capacità di discriminare le particelle. Le informazioni che il disdrometro-visibilimetro è in grado di fornire sono numerose, tra queste si ricordano: visibilità media (in m); intensità di pioggia (in mm/h); pioggia accumulata; distribuzione delle gocce di pioggia; velocità media delle particelle (in m/s); dimensioni medie delle particelle (in mm) e tipo di precipitazione. L'intervallo di visibilità misurabile dallo strumento va da 0 a 20000m, con un'accuratezza del 10%. Le particelle rilevabili dallo strumento hanno un diametro che va da 0.1mm a 30mm (con accuratezza del 5%) ed una velocità da 0.16m/s a 30m/s. Le tipologie di precipitazione che il PWS100 è in grado di riconoscere sono: pioviggine (gocce di pioggia di diametro inferiore a 0.5mm), pioggia, neve, caligine (nebbia, foschia, fumo, polvere, ecc.), grandine, neve tonda (è una precipitazione costituita da granelli di ghiaccio di diametro tra 2 e 5mm); pioggia e pioviggine congelantesi, ovvero precipitazioni liquide che ghiacciano al contatto con un oggetto).

Per l'identificazione del tipo di fenomeno e della relativa intensità vengono forniti i codici WMO (*World Meteorological Organization*); facendo uso del software *PWSViewer* di Campell Scientific è possibile connettersi allo strumento e scegliere i dati da includere nel messaggio che il PWS100 invia periodicamente. Nel caso in esame, i dati di maggiore interesse risultano essere: visibilità; tipologia di precipitazione; dimensione delle particelle. Il software di acquisizione creato è provvisto di una sezione per la lettura dei dati provenienti dal disdrometro-visibilimetro.

- **Mediaconverter Moxa** Moxa NPort IA5450A: è uno strumento che permette la connessione seriale-Ethernet; è provvisto di due porte

Ethernet a 10/100 Mbps e quattro porte seriali RS-232/422/485 con *baudrate* da 50 a 921.6kbps.

Gli strumenti meteorologici sono alimentati mediante un pannello fotovoltaico, realizzato con sei moduli di silicio policristallino, in grado di sviluppare una potenza di picco di 150W. Al pannello è connesso un modulo batterie a ricombinazione, in grado di fornire 48V con una capacità di 200Ah. In Figura 5 viene mostrato uno schema riassuntivo delle attuali interconnessioni tra gli strumenti meteorologici e l'isola fotovoltaica.

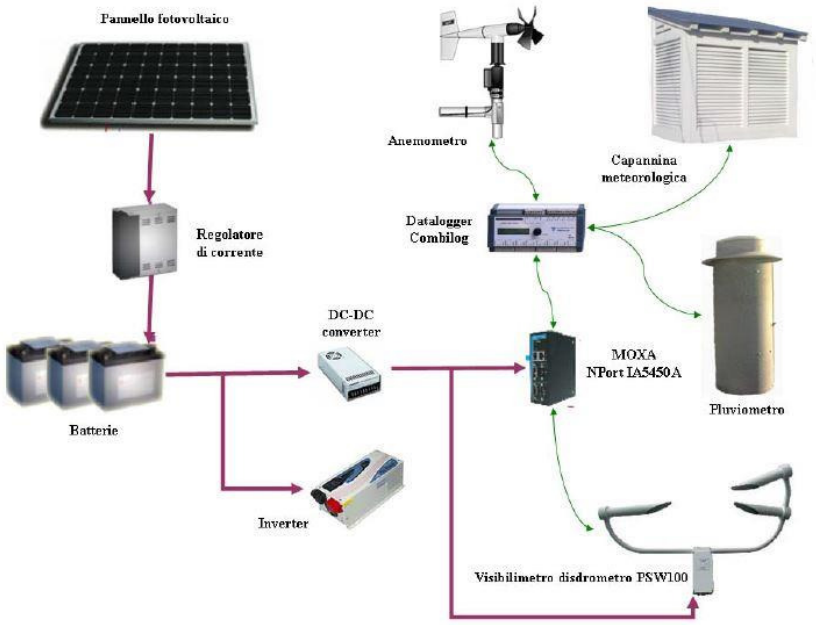

Figura 5. Schema a interconnessioni tra gli strumenti della stazione meteo.

I dati provenienti dalla stazione metereologica e le misure di potenza registrate dall'OSA (*Optical Spectrum Analyzer*) sono stati utilizzati per studiare il comportamento del sistema FSO al variare delle condizioni atmosferiche. Per effettuare l'analisi dei dati si è fatto ricorso all'ambiente per il calcolo numerico *MATLAB*, al software di *data-analysis Origin* ed all'ambiente di programmazione di tipo grafico *LabVIEW*, il quale consente di realizzare programmi in forma di diagrammi a blocchi. I dati sono stati raccolti impostando un intervallo di acquisizione pari a 1 secondo.

Le prime analisi effettuate hanno lo scopo di comprendere quali siano le grandezze che influenzano più significativamente l'andamento della potenza del segnale ottico ricevuta nel tempo. I parametri presi in considerazione sono i seguenti:

- Potenza del segnale (dBm); differenza tra potenza di lancio e ricevuta di ritorno.
- Temperatura esterna (°C);
- Temperatura del vetro della finestra del laboratorio (°C); deviazioni del fascio dovute alle variazioni termiche del vetro della finestra in uscita.

- Temperatura della componentistica meccanica strutturale interna del laboratorio (°C); deviazioni del fascio dovute all'escursione termica dei materiali e banchi ottici in uso.
- Temperatura del vetro della finestra del laboratorio (°C);
- Umidità (%);
- Pressione atmosferica (hPa);
- Velocità e direzione del vento (m/s e gradi di rotazione);
- Intensità ed accumulo della pioggia (mm/h).

In figura 6 è possibile osservare l'andamento delle variabili relative alla temperatura in un periodo di tempo di misure consecutive di 5 giorni (lo stesso andamento è risultato anche su scale maggiori di 15-20 giorni ripetute in più sessioni di misura).

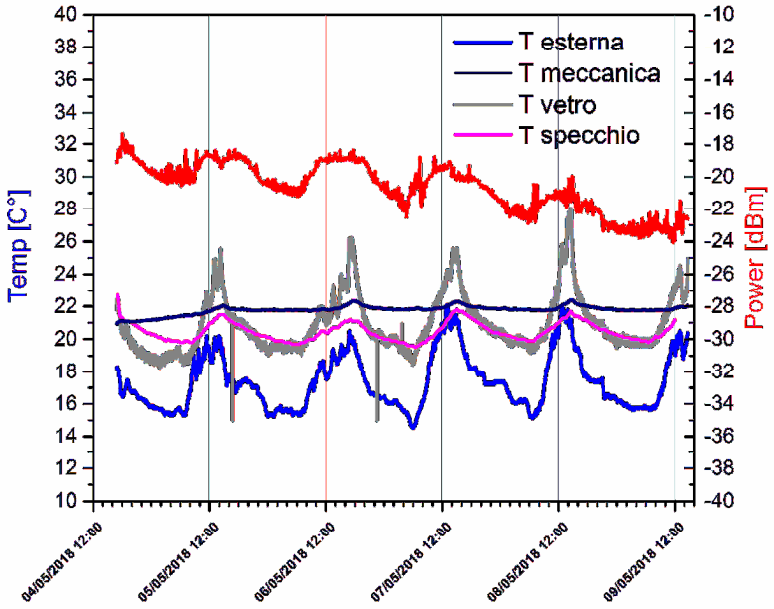

Figura 6. *Correlazione tra potenza e temperature componentistica*

Già da una prima analisi del grafico è evidente l'elevato grado di similitudine esistente tra la curva rappresentativa dell'andamento della potenza nel tempo e la curva delle diverse temperature in gioco; vi è infatti la temperatura esterna che influenza gran parte del segnale e la temperatura delle stanze di laboratorio da cui proviene il segnale stesso. Le temperature registrate dalla termocamera presentano un andamento fortemente correlato all'andamento della temperatura esterna registrata dalla stazione meteo. Queste vanno ad influenzare le dilatazioni termiche della strumentazione e componentistica meccanica, causando disallineamenti e defocalizzazioni. La temperatura del vetro delle finestre attraverso le quali passa il segnale va anch'essa ad influenzare di molto la potenza ricevuta; vi sono infatti 4 attraversamenti sui vetri (essendo due le stanze in oggetto ed essendo doppi gli attraversamenti per l'andata ed il ritorno del segnale) e questi, essendo soggetti ad irraggiamento solare, ombreggiamento e sbalzi di temperatura tra notte e giorno, sono chiaramente anch'essi soggetti a dilatazione. Potenza e temperatura risultano direttamente proporzionali

quindi; laddove c'è una variazione della temperatura si verifica anche una variazione del valore di potenza registrato. Si viene a formare un ciclo di isteresi non ideale che ne determina quelle oscillazioni in un periodo di 24h. L'affezione dell'isteresi sul segnale non è ideale in quanto le varie dilatazioni e latenze menzionate sopra, meccanicamente non tornano alle stesse condizioni di partenza; ne risulta quindi che il segnale di potenza ricevuto, complessivamente tende a decrescere al passare dei giorni.

In figura 7 sono riportati gli andamenti relativi all'umidità esterna, pressione atmosferica e velocità del vento.

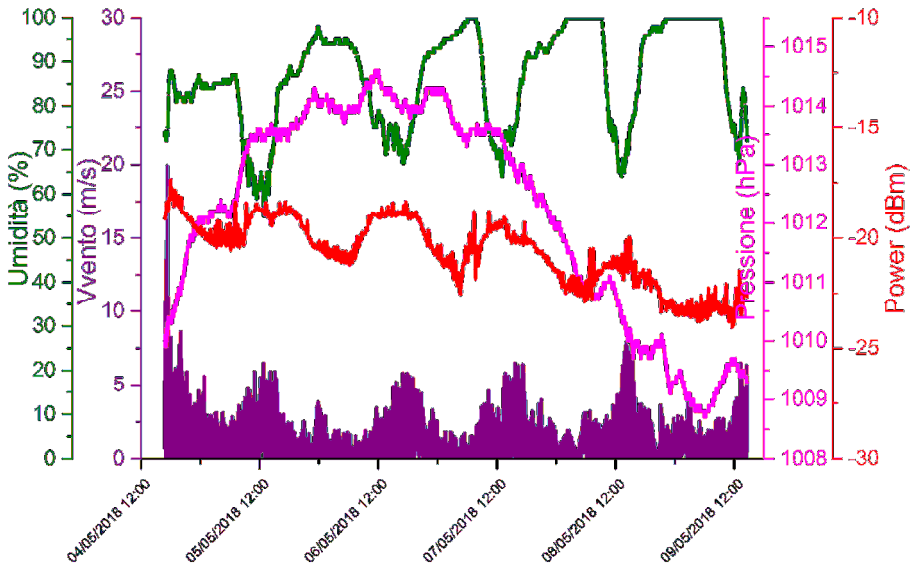

Figura 7. Correlazione tra potenza ed umidità esterna, pressione atmosferica e velocità del vento

Si osserva come la curva dell'umidità (in verde) abbia un andamento quasi perfettamente complementare rispetto alla curva di potenza, nonché, per quanto detto prima, complementare anche alla temperatura, come effettivamente ci si aspetta che sia. Le due grandezze di temperatura e umidità risultano quindi essere inversamente proporzionali; si vede come ad un aumento dell'umidità corrisponda una diminuzione della potenza ed a un abbassamento dell'umidità corrisponda invece un aumento della potenza del segnale ricevuto. Questo fenomeno ribadisce esattamente quanto detto nella trattazione teorica ovvero che un'elevata percentuale di umidità indica una maggiore concentrazione di particelle di vapore acqueo nell'atmosfera, le quali alimentano i fenomeni di *scattering*, che provocano una pesante attenuazione del segnale, quindi una diminuzione sostanziale della potenza ricevuta. Il sistema risulta comunque strettamente correlato anche agli altri fattori atmosferici. La velocità del vento per esempio (curva viola) contribuisce anch'essa ai fattori d'influenza sulla potenza ricevuta; infatti risulta chiaro ed intuitivo che all'aumentare del vento decresca l'umidità e di conseguenza aumenti la potenza ricevuta. Questo accade perché la ventilazione favorisce la vaporizzazione delle particelle d'acqua allo stesso modo in cui agisce l'innalzarsi della temperatura; all'aumentare

del vento inoltre, aumenta anche la variazione istantanea della potenza per effetto delle turbolenze.

Per quanto concerne invece la pressione in figura 7 (curva magenta), non è stato ancora possibile evidenziare un legame con l'andamento della potenza ricevuta, ragion per cui nel seguito dell'analisi ci si focalizzerà prettamente su temperatura e umidità. Ripetute misure nell'arco di due anni circa, hanno mostrato una forte incoerenza negli andamenti di pressione rispetto a quelli della potenza; non vi è evidenza sperimentale del legame diretto tra le due grandezze. Questa mancanza di legame è però ragionevole in quanto la pressione non è una variabile "diretta" come la temperatura e l'umidità e cioè non va ad influenzare in tempo reale l'attenuazione del segnale FSO; è invece una variabile "indiretta" ovvero dipendente anche essa dagli stessi fattori di umidità e temperatura. Non è risultato quindi produttivo analizzare variabili indirette come questa in quanto richiederebbe strumentazioni più sofisticate ed uno studio assai più oneroso; anche la direzione del vento insieme con la pressione è stata scartata come variabile d'interesse in quanto determinata dall'accumulo e dispersione di zone di aria calda e fredda in regioni di territorio molto vaste.

Analizzando più in dettaglio gli sbalzi di potenza tra la mattina e la sera, andando a vagliare le ore più calde del giorno, è stato osservato (figura 8) come la potenza presenti variazioni molto evidenti, fino anche a 30dBm, tra le 08:00 e le 20:00.

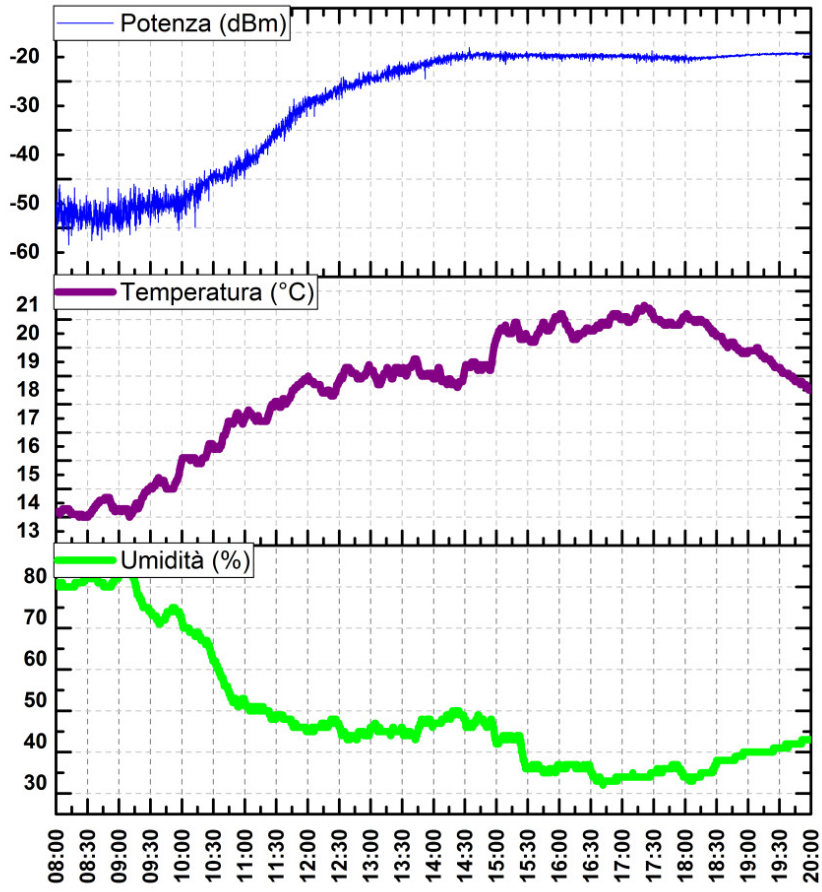

Figura 8. Andamento di potenza diurno tipico in relazione a temperatura e umidità

Si osserva inoltre come le oscillazioni puntuali di potenza maggiori si verifichino nei periodi in cui l'umidità è più alta e la temperatura più bassa, il che è in linea con la quantità di particelle di acqua nell'aria che generano *scattering*. Per studiare la variazione complessiva della potenza del segnale nelle ore diurne e nelle ore notturne si è calcolata, mediante gli algoritmi di calcolo del software *Origin*, la deviazione standard della potenza, la quale esprime proprio la variabilità dei valori registrati intorno al valor medio. Dal grafico di figura 9a si osserva in media una maggiore variabilità della potenza nelle ore diurne rispetto a quelle notturne, sempre e comunque effetto diretto di temperatura e umidità.

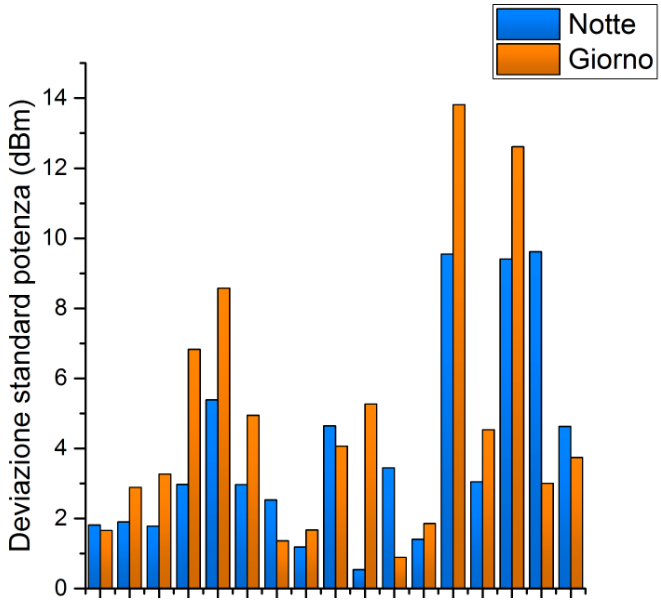

Figura 9a. Deviazione standard giorno/notte di potenza.

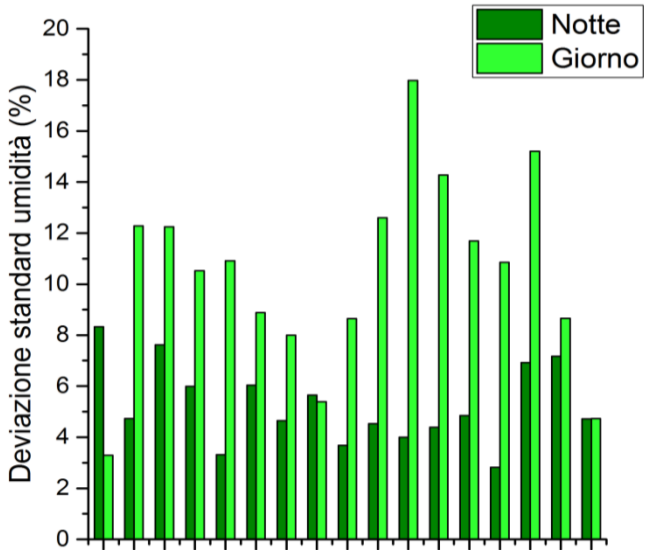

Figura 9b. Deviazione standard giorno/notte umidità.

È interessante confrontare la variabilità della potenza appena osservata con la variabilità di giorno e di notte, dell'umidità (figura 9b) è

quindi possibile vedere come anche l'umidità presenti una maggiore variabilità di giorno rispetto alla notte. Il confronto dei grafici testimonia ulteriormente la correlazione tra umidità e potenza evidenziata nel paragrafo precedente. Per analizzare in modo approfondito la variazione istantanea della potenza è tuttavia stato necessario calcolare la deviazione standard in un intervallo molto più piccolo rispetto alle 12 ore considerate nei grafici precedenti.

Si è quindi realizzato uno script in *MATLAB* in grado di analizzare un numero ristretto di campioni di potenza e umidità calcolandone rispettivamente deviazione standard e valor medio. Si è scelto di calcolare la deviazione standard e media ogni quarto d'ora ed è risultato di nuovo che la potenza subisce maggiori oscillazioni intorno al valor medio in corrispondenza di valori elevati di umidità. In particolare per umidità compresa tra il 60% e 80% si verificano variazioni di potenza da 1dBm fino a circa 2.2dBm. Le variazioni scendono notevolmente nelle ore della giornata in cui l'umidità di mantiene al di sotto del 50%; le variazioni istantanee di potenza di maggiore entità si sono registrate più e più volte nel corso di due anni di misure, confermando quanto detto, in corrispondenza di valori elevati di umidità.

Per quanto riguarda invece le precipitazioni, il discorso cambia notevolmente; la pioggia è in questo caso da considerarsi un "particolato" di grandi misure, ovvero particelle d'acqua di dimensione molto al di sopra dell'umidità. In caso di piogge leggere il segnale viene pressoché lasciato inalterato garantendo una comunicazione del sistema, ma in casi di temporali improvvisi e massicci, si oltrepassano i casi di attenuazione e *scattering* menzionati nei paragrafi precedenti, fina al raggiungere fenomeni di oscuramento (figura 10).

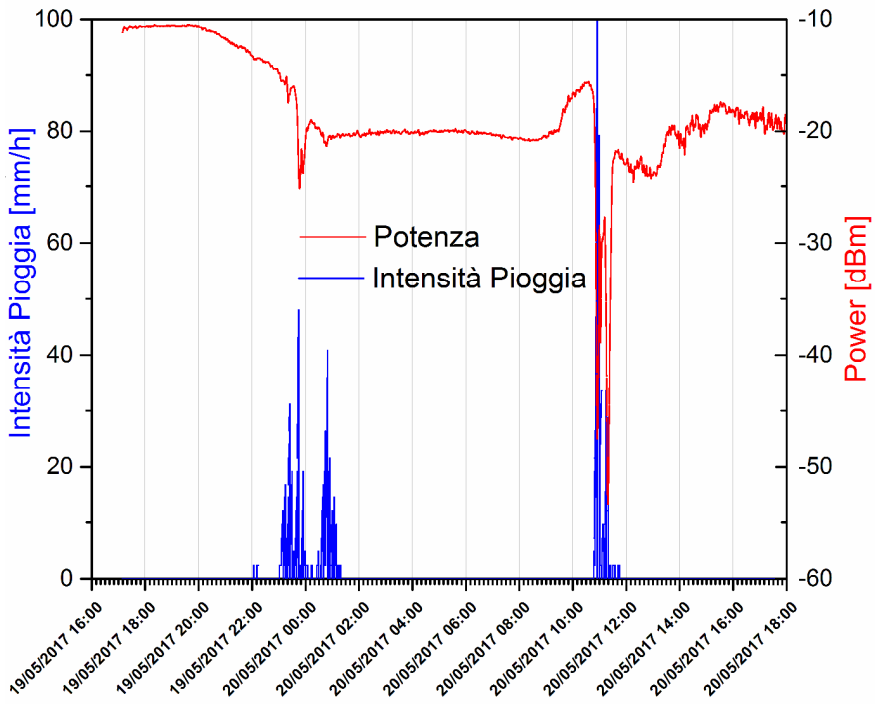

Figura 10. Effetto di un improvviso temporale sul segnale ottico.

Si può facilmente osservare come il segnale diminuisce in presenza di pioggia fitta fino anche a crollare quando oscurato da frequenza massiccia e dimensioni delle gocce che superano il mm di diametro. Per entità di pioggia contenute invece, il collegamento viene mantenuto, a meno chiaramente di effetti dovuti all'aumento di livelli di umidità atmosferica considerevole che ne consegue, di cui già parlato in precedenza. Si può quindi concludere che la pioggia non ha effetti "diretti" sul sistema nella maggioranza dei casi; può provocare un crollo repentino, ma temporaneo, del collegamento solo in circostanze di improvvisi temporali e che quindi in linea di massima viene a ripristinarsi nel giro di pochi minuti.

7. Conclusioni

Il presente lavoro è stato volto all'acquisizione di dati da un sistema ottico in spazio libero prototipale FSO in grado di trasmettere e ricevere segnali ottici viaggianti nello spazio libero, ed all'integrazione di questi con i dati provenienti da una stazione meteo. È stato studiato il comportamento del sistema al variare delle condizioni atmosferiche, analizzando le interdipendenze tra le grandezze in gioco, focalizzandosi soprattutto sulla relazione tra potenza ricevuta, temperatura ambientale, umidità atmosferica e piogge. Sebbene trovare una legge che leghi l'andamento del segnale ottico con le variazioni atmosferiche sia piuttosto complesso, si è riusciti comunque ad ottenere dei risultati preliminari di rilevante importanza. Si è visto come l'andamento della potenza sia fortemente influenzato della temperatura e dell'umidità nel tempo e come le fluttuazioni della potenza siano legate al livello di particelle di acqua sospese nell'aria. Dati più elaborati ed esaustivi saranno collezionati nel prossimo futuro con la reintegrazione nella stazione meteo del disdrometro-visibilimetro, il quale è stato fuori uso per molto tempo; questo, essendo espressamente dedicato alla misura della concentrazione di particolato in sospensione nell'aria, permetterà un'analisi più approfondita dei fenomeni d'interazione tra fenomeni atmosferici e segnale FSO. Sarà quindi possibile acquisire dati sulla visibilità ed avere informazioni più dettagliate circa le precipitazioni atmosferiche; nel dettaglio sarà anche possibile correlare l'andamento della potenza ricevuta con gli effetti delle polveri sottili di varia natura e dimensione. Gli studi sono stati condotti presso i laboratori di ottica della Divisione II dell'Istituto Superiore delle Comunicazioni e delle Tecnologie dell'Informazione (ISCTI), con sede presso il Ministero dello Sviluppo Economico in Roma, quartiere EUR.

Si ringraziano i colleghi del laboratorio ed in particolare Valentina Lucli, tesista in ISCOM laureatasi sotto la supervisione del Prof. Silvello Betti dell'Università degli Studi di Roma "Tor Vergata".

Bibliografia

[1] G. Susanna et al., Applicazione di sistemi di trasmissione in spazio libero "Free Space Optics" (FSO) in ambienti "Data Center" (DC) dedicati alla gestione ed allo smistamento dati, La Comunicazione, 2016.

[2] W. Ghuman et al., *Free Space Optics: Enabling optical connectivity*, Indianapolis: SAMS publishing, 2002

[3] M. A. Shemis et al., Broadly Tunable Self-Injection Locked InAs/InP Quantum-dash Laser Based Fiber / FSO / Hybrid Fiber-FSO Communication at 1610 nm, IEEE, 2018

[4] E. Ciaramella et al., "1.28-Tb/s (32 \times 40 Gb/s) Free-Space Optical WDM Transmission System", Photonics Technology Letters, IEEE, 2009

[5] G. Parca et al., Optical wireless transmission at 1.6-Tbit⁄s (16 × 100 Gbit⁄s) for nextgeneration convergent urban infrastructures, Optical Engineering 52(11), 2013.

[6] R. L. P. Larry C. Andrews*, Laser beam propagation through random media*, Bellingham, Washington: SPIE, 2005.

[7] "fSONA unveils 2-5-Gbps free-space optical systems", 2012, Online.

[8] H. Hemmati, *Near-Earth Laser Communication*, CRC Press, 2008.

[9] S. M. I. a. Z. S. Roberto Ramirez-Iniguez, *Optical Wireless Communications IR for Wireless Connectivity,* Taylor & Francis Group, Book, CRC Press, 2007.

[10] G. Willebrand, Fiber optic Without Fiber, 2001.

[11] S. G. N. a. S. K. Nayar, *Vision and the Atmosphere*, 2007.

[12] A.C.Best, *The size distribution of raindrops*, 1950: Quarterly Journal Royal Meteorological Society, 1950.

[13] A. N. Kolmogorov, The local structure of turbulence in incompressible viscous fluids for very large reynolds numbers, Compt. Rend. Acad. Sci. (SSSR), 1941.

[14] L. C. A. a. R. L. Phillips, *Laser Beam Propagation through Random Media*, SPIE Optical Engineering, 1998.

[15] I. I. a. E. K. Kim, Availability of Free Space Optics (FSO) and Hybrid FSO/RF Systems, Optical Access, Incorporated, 2002.