



PROGRAMMA INVESTIMENTI
PER LA CRESCITA E L'OCCUPAZIONE
FONDO EUROPEO DI SVILUPPO REGIONALE
Sviluppo regionale 2014-2020



PROGRAMMA INVESTIMENTI
IN FAVORE DELLA CRESCITA
E DELL'OCCUPAZIONE
FONDO SOCIALE EUROPEO
2014-2020

UNITÀ DI RICERCA GAIA

“GEOCARATTERIZZAZIONE INTEGRATA DI AEROSOL”

Relazione tecnico-scientifica

LISTA REVISIONI				
VER.	DATA VER.	PAG.	NOTE	AUTORE
1.0	2019-07-20	Tutte	Prima bozza	M. Potenza
2.1	2019-08-20	Tutte	Seconda bozza	A. Tettamanti
2.2	2019-09-02	Tutte	Terza bozza	M. Potenza, A. tettamanti
2.3	2019-09-20	Tutte	Revisione	A. Tettamanti
2.4	2019-09-25	Tutte	Revisione	M. Potenza, A. tettamanti C. Lucianaz
1.2	2018-03-10	Tutte	Versione definitiva validata dal Responsabile scientifico	M. Potenza
Le informazioni contenute nella presente Relazione tecnico-scientifica sono aggiornate all'ultima data indicata nella tabella sopra riportata.				



Unità di Ricerca GAIA “Geocaratterizzazione Integrata di Aerosol”

CINFAI – Consorzio Interuniversitario Nazionale per la Fisica delle Atmosfere e delle Idrosfere, organismo di ricerca di diritto pubblico - Capofila

Agenzia Regionale per la Protezione dell’Ambiente – ARPA VdA, amministrazione pubblica - Partner

Envisens Technologies Srl, impresa - Partner

Fondazione Clément Fillietroz-ONLUS, organismo di ricerca - Partner

Sede principale: Via Lavoratori Vittime del Col du Mont, 28 - 11100 AOSTA

CUP B36G15002270006

Indice

1. INTRODUZIONE	3
2. L'AEROSOL E L'IMPORTANZA DELLE MISURE OTTICHE	5
2.1 l'analisi spettrale della radiazione diretta	6
2.2 L'analisi angolare della radiazione che compone l'aureola	7
2.3 Misure dirette di particolato in atmosfera	8
3. SINTESI DEL PROGRAMMA OPERATIVO	9
4. ATTIVITÀ SUDDIVISA PER WP SVOLTA NEI PRIMI 18 MESI	10
4.1 ARBOL	10
4.2 SRS	10
4.3 DAT	11
5. ARBOL: DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ E DEI RISULTATI	13
5.1 Analisi del problema, concepimento della soluzione, progetto	13
5.3 Realizzazione meccanica	14
5.4 Progetto e test preliminare dell'elettronica di trasduzione e preamplificazione	14
5.5 Sintesi delle specifiche di progetto	17
5.6 Caratterizzazioni Strumentali	25
5.7 Codici per l'analisi del dato di ARBOL	29
5.8 Installazione degli strumenti presso le stazioni di osservazione	31
6. SRS: DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ E DEI RISULTATI	24
6.1 Definizione di requisiti e specifiche per SRS	24
6.2 Modalità di scelta e risultati della ricerca di mercato	27
6.3 Report del collaudo presso sede ARPA VdA	29
6.4 Report della caratterizzazione delle due unità SRS presso la sede di ARPA	33
6.5 Realizzazione dell'inseguitore automatizzato (tracker)	40
7. DAT: descrizione delle attività e dei risultati	48
7.1 Uso di modelli di trasporto radiativo e di misure pregresse per l'individuazione dei requisiti di ARBOL	48
7.2 Misura di particolato con strumentazione al suolo, appartenente alla rete di monitoraggio della qualità dell'aria di ARPA VdA	52
7.3 Campagne di misura dirette di aerosol in atmosfera e profili verticali di aerosol ottenuti con strumentazione LiDAR	55
7.4 La rete di gestione dei dati	58
8. Trasferimento Tecnologico	59

1. INTRODUZIONE

L'obiettivo conseguito dall'UdR GAIA è stato la realizzazione di dispositivi integrati per la misura combinata della radianza spettrale diretta del Sole e della distribuzione angolare dell'intensità diffusa in tutto il cielo, allo scopo di una caratterizzazione in quasi tempo reale dell'aerosol contenuto in atmosfera. Questi strumenti, una volta validati, potranno essere messi in commercio andando a coprire le necessità di amministrazioni pubbliche, enti strumentali, industrie e anche di centri di ricerca di base e applicata. Per conquistare una quota di mercato in un ambito di questo tipo, altamente tecnologico e di nicchia, l'UdR GAIA ha sviluppato un sistema innovativo integrato che potrà essere immesso sul mercato a prezzi inferiori rispetto agli attuali competitor.

La presenza dell'aerosol determina diversi effetti, due dei quali rappresentano il punto di forza di GAIA. Il primo effetto è la rimozione di potenza ottica da parte della radiazione diretta a causa di processi di diffusione, o scattering, di luce e di assorbimento della stessa. La radiazione in arrivo a terra è quindi sottoposta ad un fenomeno detto di estinzione, che segue la legge di Lambert-Beer. Il secondo effetto è dovuto agli stessi fenomeni di scattering (ma non di assorbimento) che avvengono nella regione circostante al disco solare, e in linea di principio in tutto il cielo. La luce solare infatti viene diffusa a diversi angoli in dipendenza dalla dimensione (e secondariamente dalle proprietà ottiche) delle particelle, quindi è in grado di arrivare a terra anche da direzioni molto diverse da quelle identificate dalla superficie del Sole. Si forma perciò una regione illuminata, detta *aureola*, la cui distribuzione angolare di intensità è legata prevalentemente alle caratteristiche dimensionali degli aerosol presenti in atmosfera.

Obiettivo degli strumenti sviluppati dall'UdR GAIA è di sfruttare entrambi questi fenomeni per la determinazione delle caratteristiche degli aerosol. I dati saranno quindi costituiti da coppie spettro solare-profilo di intensità dell'aureola, a diverse lunghezze d'onda. I dispositivi permettono di raccogliere questi dati ogni 5-10 minuti durante tutto l'arco della giornata grazie ad un sistema di inseguimento integrato nei singoli dispositivi. I dati vengono raccolti in un database che potrà facilmente venire interfacciato ad un altro database centrale, dove i dati provenienti da ciascun dispositivo saranno distinti in base alla geolocalizzazione di ciascun sensore.

L'UdR GAIA ha integrato le attività di tre progetti operativi paralleli, due dei quali rivolti allo sviluppo e alla realizzazione di dispositivi per la rivelazione dei parametri ottici e la raccolta e distribuzione dei dati, che vengono integrati dal terzo progetto.

I partner che hanno preso parte all'UdR GAIA sono: Consorzio Interuniversitario Nazionale per la Fisica delle Atmosfere e delle Idrosfere (CINFAL, capofila, che esprime il Responsabile scientifico), Fondazione Clément Fillietroz-ONLUS Osservatorio Astronomico della Regione Autonoma Valle d'Aosta (OAVdA, che esprime il Responsabile tecnologico), Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente della Valle d'Aosta (ARPA), Envisens Technologies Srl (EST).

L'UdR rappresenta un *unicum* di tecnologia e competenza, che è stato in grado di progettare, realizzare, calibrare i dispositivi grazie alle competenze di CINFAL, OAVdA e EST, di confrontare i risultati con le misure indipendenti a disposizione di ARPA e di realizzare misure di alta

precisione grazie al funzionamento combinato della strumentazione già in possesso di ARPA e del Laboratorio Eliofisico di OAVdA. La partecipazione dell'Università degli Studi di Milano, precisamente del Laboratorio di Strumentazione Ottica e dell'Officina Meccanica del Dipartimento di Fisica, ha fornito un supporto essenziale anche in relazione al cofinanziamento necessario al completamento del progetto.

Di seguito verranno riportati i principali risultati dell'attività. Ciascun dispositivo è costituito dalle seguenti componenti:

- 1) uno spettroradiometro (SRS), acquisito sul mercato, che raccoglie la radiazione solare diretta e restituisce uno spettro calibrato,
- 2) un array bidimensionale (2D) di bolometri (ARBOL) operanti a diverse lunghezze d'onda che fornisce una immagine dell'aureola solare a molte lunghezze d'onda,
- 3) un sistema di inseguimento automatico, capace di puntare costantemente il disco del Sole,
- 4) un sistema di geolocalizzazione che fornirà un tag temporale ad ogni dato raccolto

Le singole componenti qui elencate sono poi state integrate in un unico dispositivo.

2. L'AEROSOL E L'IMPORTANZA DELLE MISURE OTTICHE

La presenza di aerosol in atmosfera dipende da diversi fattori, solo alcuni dei quali sono di origine antropica. Ciononostante, la distinzione degli aerosol di origine antropica rappresenta a tutt'oggi una delle maggiori sfide rivolte a un controllo sistematico delle emissioni inquinanti e dell'abbattimento degli effetti collaterali ad essi collegati.

In generale, gli aerosol di origine naturale sono dovuti alla frantumazione per effetto di agenti atmosferici di materiale minerale proveniente dai suoli, dall'acqua marina, etc. Tali processi sono in grado di determinare la formazione di particelle con dimensioni tipicamente maggiori di un micron. Al contrario, gli aerosol di origine antropica, tipicamente derivanti da processi di combustione, seguono un percorso opposto: la combustione libera molecole o particelle di dimensione di pochi nanometri che poi subiscono fenomeni di coalescenza e portano alla formazione di strutture poco compatte che raggiungono al massimo la dimensione di un micron (vedi Figura 2.1).

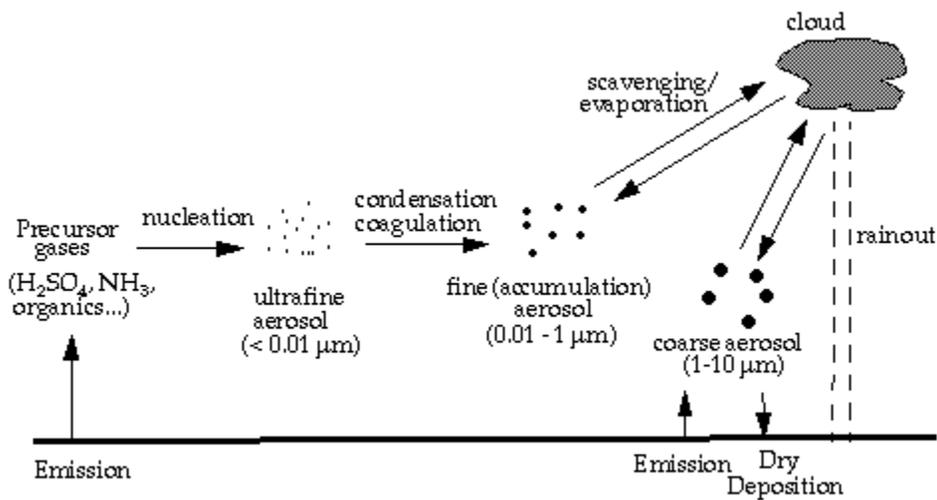


Figura 2.1: Rappresentazione schematica della formazione di aerosol di origine antropica. La formazione di strutture ultrafini è seguita da fenomeni di condensazione che portano alla crescita fino a dimensioni dell'ordine del micron.

Le due specie sono quindi ragionevolmente distinte già in base ad un semplice criterio granulometrico. Tuttavia la determinazione della dimensione di questi oggetti non è semplice, soprattutto a causa della differente struttura interna delle particelle, del possibile effetto di ricoprimento a causa della condensazione di acqua (o altre sostanze chimiche), come di altri effetti legati alla natura complessa e eterogenea di questi oggetti.

In maniera semplificata, il problema è rappresentato dal fatto che è sempre possibile trovare particelle diverse che forniscono lo stesso risultato di una misura rivolta alla determinazione della forma.

L'unico metodo che è in grado di superare questa difficoltà è rappresentato dall'osservazione diretta dei grani, per mezzo di tecniche di microscopia soprattutto elettronica, che però rappresenta un approccio estremamente dispendioso in termini di tempo.

Una ulteriore differenziazione delle caratteristiche degli aerosol di origine naturale da quelli di origine antropica da combustione è che molto spesso questi ultimi sono dotati di forti assorbimenti di radiazione visibile. In molti casi, quindi la caratterizzazione può avvenire semplicemente accumulando piccoli spessori di aerosol su filtri in sistemi a flusso, e analizzando successivamente i filtri in dispositivi ottici atti a determinare l'assorbimento della radiazione visibile.

2.1. L'analisi spettrale della radiazione diretta

L'irradianza spettrale diretta, che descrive la quantità di radiazione solare che raggiunge il suolo senza essere assorbita o diffusa in atmosfera, è data dalla legge di Lambert-Beer:

$$F(\lambda) = F_0(\lambda) \exp[-\tau(\lambda)]m$$

dove F_0 rappresenta l'irradianza spettrale fuori dall'atmosfera, $\tau(\lambda)$ lo spessore ottico spettrale dell'atmosfera e $m = 1 / \cos(\text{SZA})$, dove SZA è l'angolo zenitale del Sole, costituisce l'airmass. $\tau(\lambda)$ è dato dalla somma dello spessore ottico dato dalla diffusione dalle molecole d'aria, quello di assorbimento dei gas e quello di nostro interesse, degli aerosol, che indicheremo con $\tau_a(\lambda)$. In linea di principio è quindi possibile ricavare lo spessore ottico degli aerosol indipendentemente dalla lunghezza d'onda conoscendo gli altri due e misurando $\tau(\lambda)$, ovvero misurando l'irradianza spettrale diretta. Questo metodo si dice metodo diretto.

Altrimenti si può lavorare in alcune finestre spettrali dove è noto che l'assorbimento dei gas è nullo o del tutto trascurabile, riducendosi quindi a dover conoscere solo la diffusione delle molecole d'aria. Questo metodo viene detto metodo delle finestre.

In entrambi i casi l'obiettivo è quello di ottenere una conoscenza di $\tau_a(\lambda)$ sufficientemente accurata da poter parametrizzare questa funzione secondo la relazione di Angstrom,

$$\tau_a(\lambda) = \beta \lambda^{-\alpha}$$

dove β è legato alla concentrazione degli aerosol e assume il valore dello spessore ottico alla lunghezza d'onda di 1 micron, mentre α si dice coefficiente di Angstrom e descrive la pendenza spettrale della funzione e viene determinato dal tipo di aerosol (vedi più sotto).

Entrambi i termini sono di interesse nel nostro caso, con differenti criticità nella loro determinazione. β necessita di una misura assoluta (ovvero calibrata propriamente per fornire la potenza della radiazione solare); α necessita di una adeguata conoscenza dei termini da considerare, come descritto in precedenza. Inoltre, α dipende dall'intervallo spettrale di lavoro. Da notare che l'errore su β si ripercuote anche sulla determinazione di α .

È chiaro che una misura adeguata dello spessore ottico $\tau_\alpha(\lambda)$ non richiede strumentazione particolarmente critica dal punto di vista della risoluzione spettrale, il che semplifica molto i requisiti tecnologici.

Questo tipo di misure è già a disposizione di ARPA. L'innovazione apportata dall'UdR GAIA consiste nell'aver realizzato dispositivi che possano operare su campo in maniera automatica, in maniera tale da accedere alle informazioni relative agli spessori ottici degli aerosol in diverse posizioni e quote caratterizzando in tal modo una sezione di atmosfera, detta transetto. Avere a disposizione strumenti automatici permette di aumentare le informazioni necessarie e ottenerle ad un prezzo concorrenziale rispetto ai prodotti attualmente leader del settore nel mercato di riferimento.

Si noti che ricavando gli spessori ottici da diverse quote si ha anche la possibilità di ricavare l'informazione su eventuali disuniformità delle proprietà degli aerosol lungo la verticale. Questo risultato può essere confrontato con quanto si ottiene in ARPA con misure LiDAR.

Inoltre l'attività presso il Laboratorio Eliofisico di OAVdA ha permesso e permette di raccogliere dati di riferimento per le misure a campo, nonché di operare misure di interconfronto dei vari dispositivi con la strumentazione residente a Saint-Barthélemy, ben caratterizzata.

2.2. L'analisi angolare della radiazione che compone l'aureola

Come accennato precedentemente, la luce solare che entra in atmosfera e attraversa lo strato di aerosol viene diffusa. Ciascuna particella diffonde, sostanzialmente per diffrazione, la radiazione solare entro un angolo approssimativamente dato da:

$$\theta = \lambda/d$$

dove d rappresenta la dimensione della particella. Più in dettaglio, la distribuzione angolare dell'intensità diffratta segue andamenti che sono strettamente legati alla dimensione forma e composizione della particella, anche se la dimensione è la grandezza che determina maggiormente il fenomeno diffrattivo.

Ciascuna particella nello strato di aerosol diffonde la luce solare, che raggiunge quindi il punto di rilevazione (lo strumento) con una dipendenza angolare dettata dalla stessa legge che stabilisce l'andamento angolare dell'intensità diffusa. In altre parole, la dipendenza angolare dell'intensità

diffusa fornisce un'informazione del tutto analoga a quella che si otterrebbe mediante una misura tradizionale di scattering statico, che fornisce il cosiddetto *fattore di forma* del campione misurato (si noti che tale fattore non dipende dalla forma della particella).

Le dimensioni tipiche delle particelle misurate con questo approccio sono tipicamente ben superiori al micron. Grazie alla dipendenza dell'angolo dalla lunghezza d'onda, in alcuni casi la distribuzione può mostrare una distribuzione cromatica apprezzabile. E' quindi per questo motivo che si è optato per realizzare strumenti in grado di produrre una informazione multispettrale, su un numero di bande che è stato definito sulla base di strumenti analoghi in uso anche presso ARPA.

Questa misura fornisce inoltre un'informazione importante per l'interpretazione dei dati spettrali. Conoscere, anche in maniera approssimata, la distribuzione dimensionale delle particelle di aerosol nell'intervallo dimensionale superiore al micron produce infatti una conoscenza di quello che necessariamente sarà l'effetto di estinzione dello stesso aerosol nella misura diretta. Diventa quindi possibile emendare i dati spettrali mediante l'informazione derivante dai dati sulla distribuzione angolare misurata.

2.3. Misure dirette di particolato in atmosfera

Grazie alla integrazione dell'attività in corso presso il Dipartimento di Fisica dell'Università degli Studi di Milano, è stato possibile aggiungere alla conoscenza dell'aerosol importanti elementi indipendenti derivanti da misure dirette di particolato con un metodo del tutto innovativo.

Si tratta del metodo SPES (Single Particle Extinction and Scattering), sviluppato negli scorsi anni presso il Laboratorio di Strumentazione Ottica di Milano. Durante lo svolgimento delle attività dell'UdR GAIA è stato realizzato e validato uno strumento portatile e completamente indipendente per la misura SPES di particolato in atmosfera. Come già dimostrato, mediante voli in pallone aerostatico è possibile svolgere misure dirette delle proprietà ottiche del particolato raccolto in loco in atmosfera, eseguendo scansioni verticali e ricavando il profilo verticale degli aerosol mediante il metodo SPES. Questo approccio del tutto innovativo di raccolta dati direttamente in atmosfera rappresenta una delle novità introdotte dall'UdR, e costituisce al momento un punto di partenza per andare a approfondire la caratterizzazione delle proprietà ottiche del particolato.

Lo stesso approccio SPES ha fornito e sta fornendo tutt'ora importanti informazioni complementari sulle particelle grazie a campionamenti dello strato superficiale di neve deposta annualmente in alta quota. Grazie all'attività dell'Università degli Studi di Milano, da quattro anni vengono raccolti campioni sopra i 3000 metri nel bacino di accumulo superiore del Ghiacciaio del Rutor. I campioni vengono raccolti mediante un metodo messo a punto specificatamente con questo obiettivo, che permette un carotaggio agevole e veloce dello strato nevoso annuale fino a una profondità di circa 7 metri. I campioni raccolti vengono quindi trasferiti a Milano senza alcuna fusione, conservando in questo modo il contenuto solido di particolato. Le sezioni del carotaggio

vengono quindi preparate e sezionate secondo i criteri utilizzati per i carotaggi antartici, estraendo aliquote di ghiaccio che viene conservato in cuvette sterili fino al momento della misura. Le misure prevedono la fusione dei campioni, la loro analisi mediante metodi ottici e il ricongelamento immediato al termine della misura. In tal modo, pur perdendo la componente solubile del materiale contenuto nel campione originale, la componente solida si mantiene pressoché intatta per successive analisi.

I lavori recenti del Laboratorio di Strumentazione Ottica hanno mostrato che analizzando particelle sospese in acqua si accede a informazioni preziose quali per esempio la forma e la eventuale struttura frattale delle particelle, molto più difficili da ottenere dalle misure dirette in aria. Queste informazioni sono fondamentali per la determinazione delle proprietà ottiche, e quindi anche per l'interpretazione dei dati ricavati dai dispositivi di GAIA.

Infatti l'ipotesi standard alla base dell'interpretazione di tali dati è – necessariamente – che le particelle siano sferiche e compatte. Grazie alla conservazione del particolato precipitato nella neve, le particelle vengono preservate e possono venire misurate nello stesso stato in cui si sono deposte. Questo studio è in corso da anni presso le due Università di Milano, che dispongono anche delle strutture necessarie per processare tutti i campioni in maniera tale da garantire la perfetta conservazione del particolato fino al momento della misura.

Alle misure SPES si sono associate misure iperspettrali svolte nei laboratori di Milano Bicocca e analisi chimiche dei principali componenti svolte grazie ad una collaborazione attivata con l'Università Cà Foscari di Venezia.

Questi aspetti rendono l'UdR GAIA unica e difficilmente ripetibile a livello nazionale e internazionale, integrando aspetti di competenze presenti sul territorio e caratteristiche del territorio stesso che permettono uno sviluppo e una validazione delle tecniche e tecnologie altrimenti molto difficilmente ottenibili in modo così diretto.

3. SINTESI DEL PROGRAMMA OPERATIVO

Il programma di ricerca e di sviluppo dei dispositivi ha integrato tre progetti operativi paralleli e indipendenti. I tre progetti sono sinteticamente descritti qui sotto:

- **ARBOL**: realizzazione di un dispositivo bolometrico basato su singoli sensori indipendenti, operanti in parallelo per la determinazione della distribuzione angolare della luce diffusa intorno al disco solare.
- **SRS**: realizzazione di un dispositivo per la misura della attenuazione della luce solare da parte dello strato di aerosol presente in atmosfera, per ricavare lo spessore ottico dello strato a partire da misure spettrali; realizzazione di un sistema di puntamento ad hoc per SRS e ARBOL in parallelo.
- **DAT**: realizzazione di un sistema integrato hardware-software in grado di acquisire, raccogliere e analizzare grandi moli di dati, non necessariamente di buona qualità, provenienti da fonti diffuse sul territorio e eterogenee tra loro. Applicando i criteri e i concetti di base degli approcci "Big Data" nell'analisi dei dati, la cui quantità crescerà rapidamente nel tempo, sarà possibile estrarre le informazioni più rilevanti.

I tre progetti sono stati in grado di portare a termine lo sviluppo di dispositivi singoli e di integrarli in un unico dispositivo, in grado di operare autonomamente sia dal punto di vista del puntamento e della movimentazione, sia dal punto di vista della raccolta e trasmissione dei dati, fino alla elaborazione finale e presentazione dei risultati. Il sistema complessivo risultante potrà essere valorizzato dalla ditta EST, partner impresa dell'UdR GAIA, che già opera in un settore di mercato analogo.

4. ATTIVITÀ SVOLTA SUDDIVISA PER WP

Sulla base dell'inquadramento scientifico dato sopra, di seguito verranno dettagliate le attività svolte dall'Unità di Ricerca, con riferimento ai work packages (WP). Tutte le azioni relative ai vari progetti operativi e alle varie componenti dei dispositivi verranno dettagliate e inquadrate nel quadro generale dello sviluppo tecnologico e scientifico più avanti.

4.1. ARBOL

WP1:

Definizione rigorosa dei requisiti per la realizzazione di un sistema di sensori diffusi sul territorio per la misura quantitativa dell'aureola solare; definizione rigorosa delle specifiche del sistema integrato e di ciascun sensore; definizione delle specifiche dell'inseguitore

WP2:

Definizione di bolometri, interfacce, raccolta luce, maschere multiwavelength, inseguitore

WP3:

Progetto di più schede PCB che ospitano i sensori ARBOL identificati nel WP2, la circuiteria di condizionamento e di controllo. Definizione della geometria di posizionamento dei sensori in una matrice compatta.

WP4:

Calibrazioni: a) calibrazione bolometrica, che permette di misurare la quantità assoluta di luce che raggiunge ciascun pixel del bolometro; b) la calibrazione angolare, che permette di risalire alla distribuzione angolare dell'intensità luminosa in funzione dell'angolo centrato sul Sole. Grazie all'introduzione di adeguati sensori di temperatura, e in seguito alla loro validazione sul campo, non si è reso necessario procedere ad una approfondita calibrazione bolometrica dei sensori in camera climatica per correggere la variazione di risposta al variare della temperatura ambientale.

Entrambi i dispositivi sono stati calibrati completamente.

WP5:

Definizione ed implementazione dell'algoritmo di processamento dei dati generati da ARBOL. Sistema di fotometria (estrazione dello spessore ottico).

WP6:

I sensori sono stati installati presso la sede di ARPA VDA e di OAVdA, dove stanno producendo dati come previsto.

4.2. SRS

WP1:

Tutti i partner hanno partecipato al WP1 al fine di approfondire, attraverso una dettagliata analisi bibliografica, il panorama della ricerca e dello sviluppo industriale sugli argomenti di riferimento del Progetto operativo.

WP2:

Volto all'acquisizione degli spettroradiometri che, finemente calibrati, raggiungono oggi il grado delle specifiche definite nel precedente WP. Realizzazione di un pre-dimostratore mediante le facilities offerte da OAVdA in Laboratorio Elio fisico.

WP3:

La calibrazione è stata eseguita in laboratorio e a banco ottico al fine di caratterizzare adeguatamente i vari componenti dello spettroradiometro: ottica di ingresso e shutter, fibra ottica, spettroradiometro stesso (caratterizzazione del buio e dell'asse delle lunghezze d'onda).

WP4:

Durante il WP si è realizzato il codice operativo per l'acquisizione in continuo dei dati durante tutta la giornata e i codici per l'elaborazione dei dati dello spettroradiometro Avantes a posteriori su server dell'Arpa VdA. Durante le fasi di test si è utilizzato il software Avasoft fornito dal produttore per l'utilizzo a banco dello strumento ma tale software non permette nessun tipo di automatizzazione delle procedure. Per tale motivo si è quindi provveduto ad interfacciarsi con lo strumento tramite l'interfaccia API fornita dal produttore. Si è quindi creata una struttura software in Python che si interfaccia con i comandi dello strumento in modo da poter sviluppare le operazioni desiderate.

WP5:

Design meccanico e implementazione del sistema di tracking solare dedicato alla strumentazione ottica. A partire dagli output di tag temporale e di posizione si è realizzato un sistema dedicato a due attuatori in grado di inseguire la posizione apparente del Sole durante tutto il giorno in totale autonomia dato il solo stazionamento in bolla del setup strumentale.

WP6: La fase finale del progetto i due prototipi sviluppati sono stati posizionati rispettivamente sul tetto piano di ARPA e all'interno della terrazza scientifica di OAVDA. Si è così acquisito dati in contemporanea allo strumento ottico sviluppato in ARBOL.

4.3. DAT

WP1:

Finalizzato a definire in modo rigoroso i requisiti per la realizzazione di un sistema di acquisizione e trasmissione dei dati raccolti da sensori diffusi sul territorio, così come a definire le specifiche del sistema di raccolta ed elaborazione dei dati

WP2:

Ha contemplato le seguenti attività: a) identificazione dei sensori disponibili sul territorio utili allo studio; b) la raccolta dati preliminare per l'istruzione del sistema di acquisizione e analisi; c) la raccolta dati per la definizione della strategia di acquisizione e analisi dati; d) il supporto tecnico alla scelta dei sensori.

WP3:

Esecuzione di campagne di misura per la raccolta diretta di dati sulle proprietà ottiche del particolato in atmosfera, allo scopo di integrare l'informazione proveniente dalla raccolta dati del WP2 all'interno del quadro di interpretazione dei risultati. Sono stati utilizzati due strumenti: 1) il LiDAR operante presso ARPA VdA; 2) uno strumento di nuova concezione che permette la misura diretta dei parametri ottici di singole particelle. Le misure sono state eseguite anche da pallone aerostatico come previsto, e proseguiranno durante campagne di misura in giorni scelti adeguatamente per la valutazione dei diversi fattori che possono influenzare l'effetto del trasporto radiativo in atmosfera.

WP4:

Esecuzione di diverse campagne di misura per lo studio del pulviscolo contenuto nella criosfera allo scopo di ottenere dati molto accurati sulle proprietà ottiche del particolato. Scopo dello studio sperimentale è di integrare l'informazione proveniente dalla raccolta dati del WP2 e del WP3 all'interno del quadro di interpretazione dei risultati. E' stato utilizzato uno strumento di nuova concezione fornito dall'Università di Milano e operante all'interno dei laboratori dei MIInao Bicocca, che permette la misura diretta dei parametri ottici di singole particelle. Sono state eseguiti campionamenti in quota in maniera tale da prevenire fenomeni di fusione, secondo i criteri descritti precedentemente.

WP5:

Finalizzato alla validazione della coerenza dati e test sul territorio, e alla predisposizione del database alla ricezione di dati.

WP6:

L'attività ha compreso: a) Progetto del software di acquisizione e trasmissione dati e stesura della versione preliminare b) Scrittura del software completo c) Validazione e debugging d) test del sistema di ricezione dei dati

WP7: a) Management struttura dati e storage database b) messa in funzione operativa del database

5. ARBOL: DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ E DEI RISULTATI

Al fine di una migliore comprensione dell'apporto tecnico, scientifico e del corrispondente trasferimento tecnologico, di seguito si dettaglia l'attività svolta in maniera trasversale rispetto ai WP, che sono stati analizzati precedentemente.

L'attività si è centrata sullo studio dei requisiti tecnici dei rivelatori, sull'assemblaggio dei prototipi realizzati per i test, sulla realizzazione e sull'acquisto delle componenti necessarie a completare i dispositivi. Questo lavoro contempla anche un progetto di dottorato di ricerca all'Università degli Studi di Milano che ha garantito la presenza presso CINFAI di personale in formazione per l'UdR GAIA; inoltre è stato oggetto di studi anche per una tesi di laurea magistrale, sempre presso l'Università degli Studi di Milano.

5.1. Analisi del problema, concepimento della soluzione, progetto

Il primo obiettivo affrontato è stato la definizione di requisiti e specifiche per la realizzazione dello strumento in grado di produrre dati di qualità tale da descrivere il particolato partendo dall'osservazione dell'aureola solare. In particolare:

- Sono state effettuate simulazioni basate sul modello di trasporto radiativo LibRadtran per stimare i flussi radiativi del Sole e del cielo.
- Sono state considerate diverse configurazioni opto-meccaniche dello strumento da realizzare ed è stata selezionata la configurazione ottimale.
- Si è optato per un sensore a fotodiode, che garantisce la massima dinamica dei segnali.
- A partire dai risultati precedenti si sono studiati e simulati i segnali di corrente e tensione che devono essere misurati dallo strumento.
- È stato realizzato un prototipo con cui sono state effettuate validazioni in situ dei dati progettuali. Tali validazioni sono state svolte sia ad Aosta, sia in Università degli Studi di Milano, sia in OAVdA a Saint-Barthélemy.

5.2. Ricerche di mercato

Numerose sono state le ricerche di mercato effettuate. Si è cercato di massimizzare l'economicità del componente da acquistare rispettando nel contempo le specifiche tecniche necessarie al funzionamento dello strumento. In particolare:

- Nel comparto opto-meccanico ricerche sono state effettuate per i filtri interferenziali, le finestre ottiche, le lenti, i pinhole e i baffle.
- Nel comparto elettronico è stata data grande attenzione alle selezioni dei fotodiodi e del modello di amplificatore operazionale, cuore del Front End elettronico.

5.3. Realizzazione meccanica

L'officina meccanica del Dipartimento di Fisica dell'Università degli Studi di Milano si è occupata della realizzazione del corpo meccanico dello strumento definitivo mediante macchine a controllo numerico, che garantiscono una buona qualità del prodotto finito. Questo è molto importante in vista della procedura di allineamento dei telescopi. Sia il corpo esterno sia le varie componenti interne sono ultimati con le corrette specifiche.

5.4. Progetto e test preliminare dell'elettronica di trasduzione e preamplificazione

È stata effettuata una dettagliata progettazione del Front End dello strumento. Le configurazioni circuitali considerate sono state numerose: in conclusione si è optato per una soluzione di amplificazione a transimpedenza a due stadi. I seguenti aspetti sono stati considerati durante la progettazione:

- Una stima dei segnali analogici osservati, seguente al lavoro già elencato al punto 5.1
- Il calcolo dettagliato del rumore elettronico generato dagli stadi di amplificazione.
- Il calcolo dettagliato degli effetti delle variazioni di temperatura sull'elettronica in fase di progettazione.

Sempre a causa delle specifiche tecniche richieste per le osservazioni (la natura spettrale della radiazione) si è deciso di realizzare due differenti versioni di PCB: entrambe sono state disegnate, realizzate e saldate. Tuttavia soltanto una di queste (descritta in seguito) è stata ritenuta sufficientemente performante per i requisiti di ARBOL.

L'attività svolta per ARBOL ha portato alla realizzazione dello strumento, costituito da sei telescopi dotati di obiettivi da 25 mm di diametro e 50 mm di focale, al cui piano focale viene collocato un pinhole realizzato ad hoc mediante fotoincisione, che seleziona l'apertura angolare della regione di cielo dalla quale raccogliere la radiazione. Davanti alla lente obiettivo viene posizionato un filtro interferenziale e una finestra ottica per la protezione del filtro. A ridosso del pinhole viene collocata una PCB che monta il fotodiodo e l'elettronica di front end, che fornisce una preamplificazione analogica dei segnali da inviare all'unità esterna di digitalizzazione.

L'architettura del sistema è stata scelta in maniera tale da disporre di un dispositivo unico, nel quale i sei telescopi sono sempre allineati e non necessitano procedure specifiche. Inoltre i telescopi sono realizzati sotto forma di cartucce, assemblate ciascuna in maniera tale da poter essere rimpiazzata facilmente senza alterare le proprietà di tutte le altre.

Infine, la disposizione ai vertici di un esagono permette una buona compattezza e solidità meccanica, e inoltre lascia al centro lo spazio per il montaggio di una ulteriore cartuccia che monta

il sistema ottico per il tracking. Questo a sua volta risulta automaticamente allineato con gli altri sei telescopi, semplificando ulteriormente l'assemblaggio del dispositivo finale. Inoltre è stato effettuato uno studio accurato di ray tracing per lo studio dell'inserimento di baffle per la rimozione della luce diffusa all'interno dei telescopi (luce stray).

In Figura 5.1 è mostrato un rendering tridimensionale dello strumento assemblato con evidenziati baffle, pinhole e sensore (a sinistra) e di una singola cartuccia a destra. In Figura 5.2 si riporta un esempio di ray tracing per la rimozione della luce diffusa. In Figura 5.3 si vede il sistema in fase di realizzazione, con in evidenza le flange con cui vengono tenuti assieme i cilindri che contengono le cartucce.

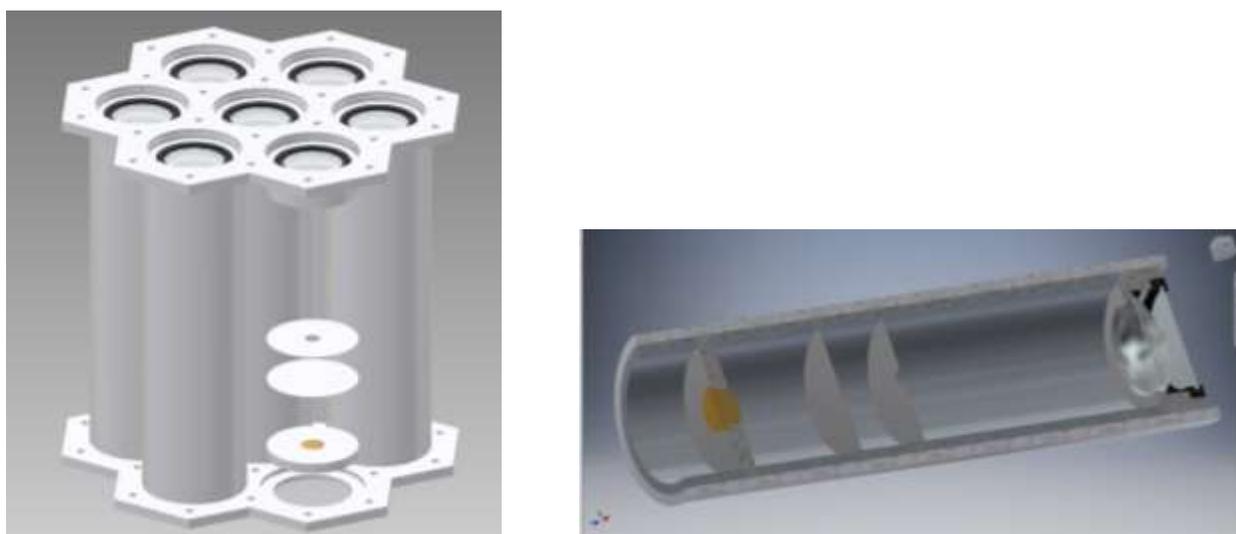


Figura 5.1: A sinistra, rendering del sistema con posizionamento dei baffle, dei pinhole e del sensore (in giallo). A destra, una sezione di un telescopio.

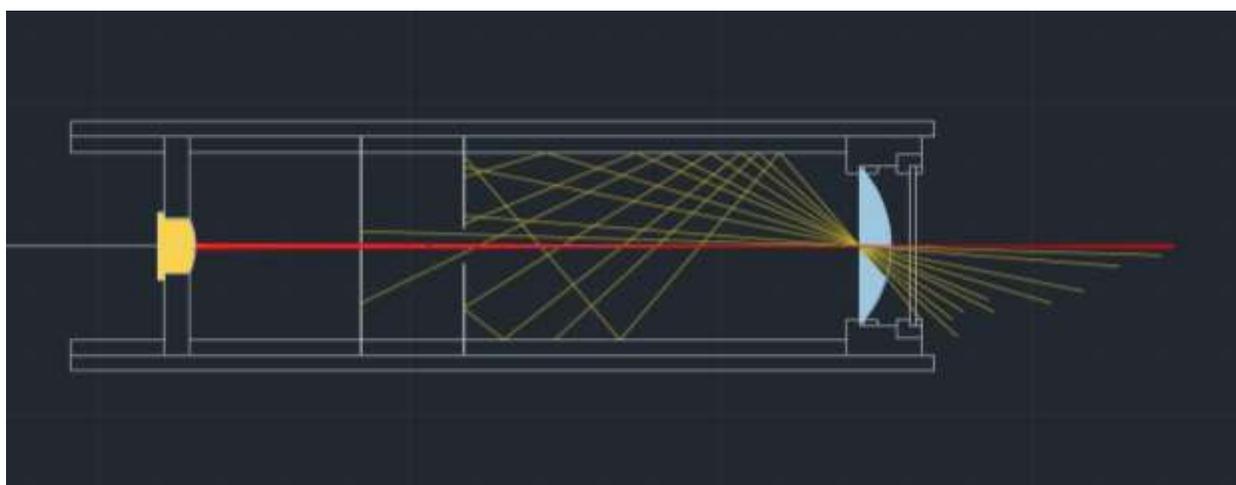


Figura 5.2: Esempio di risultati ottenuti mediante ray tracing allo scopo di ottenere la migliore rimozione della luce stray all'interno dei telescopi.



Figura 5.3: Il sistema in fase di realizzazione presso l'officina meccanica del Dipartimento di Fisica dell'Università degli Studi di Milano. In evidenza le flange con cui vengono tenuti assieme i cilindri che contengono le cartucce.

5.5. Sintesi delle specifiche di progetto

In questa sezione riassumiamo le specifiche tecniche che racchiudono le migliori scelte effettuate sulla base delle analisi, teoriche e di laboratorio, delle diverse soluzioni possibili. Riportiamo anche i metodi con i quali sono stati ottenuti i risultati più importanti.

Geometria del Sistema ARBOL

La tabella seguente contiene alcune grandezze fisiche di riferimento derivanti dal design definitivo di ARBOL:

Grandezza	Simbolo	Formula	Valore
Diametro lente in ingresso	D		25 mm
Area della lente	S	$S = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2$	~ 491 mm ²
Lunghezza focale della lente	F		50 mm
Diametro pinhole	Φ		1 mm
FOV, semiangolo	Θ	$\theta = \frac{\varphi}{2f}$	10 ⁻² rad
Angolo solido osservato	Ω	$\Omega = \pi\theta^2$	π10 ⁻⁴ sr
Larghezza banda spettrale filtri	Δλ		10 nm

Simulazioni numeriche

L'intensità della luce diffusa dall'atmosfera viene quantificata da una grandezza che prende il nome di radianza. Conoscere una stima di tale grandezza, nelle condizioni in cui verrà misurata da ARBOL, è importante perché costituisce la base su cui sviluppare la progettazione della meccanica e dell'elettronica.

Le simulazioni numeriche di trasferimento radiativo non sono in grado di tener conto della specificità degli aerosol della Valle d'Aosta; tuttavia, almeno come primo approccio, sono sufficienti per stimare la radianza. Per questa ragione è stato sufficiente assumere un modello di aerosol standard e sfruttare il software simulativo LibRadtran (libreria per il trasferimento radiativo), ottenendo in tal modo le stime ricercate.

Cinque sono i canali spettrali in cui sono state effettuate le simulazioni: a 400 nm, 500 nm, 675 nm, 870 nm e 1020 nm, rispettivamente nel blu, verde, rosso scuro e vicino infrarosso. La radianza è stata simulata per punti del cielo distanti fino a 20° di azimuth dal Sole.

Lo spessore ottico di aerosol dell'atmosfera simulata è stato variato tramite i parametri di Angstrom α e β : il primo tiene conto della dimensione media delle particelle, mentre il secondo del carico di aerosol presente in atmosfera.

Nella tabella seguente sono riportate le radianze simulate in presenza di un'atmosfera con poco aerosol ($\beta = 0.02$), ed una concentrazione di aerosol relativamente elevata ($\beta = 0.5$). La dimensione delle particelle nelle simulazioni viene introdotta mediante il parametro α , che in questo caso è stato considerato pari a $\alpha = 1.1$ che descrive una condizione molto comune in atmosfera.

Radianze espresse in:

$$\frac{mW}{m^2 nmsr}$$

Valore di β	$\beta = 0.02$	$\beta = 0.5$
Canale 400 nm	126	653
Canale 500 nm	83	820
Canale 675 nm	33	587
Canale 870 nm	12	318
Canale 1020 nm	6	192

Le radianze in tabella si riferiscono a punti dell'almucantar distanti 2.5° dal Sole.

Scelta del Sensore

La determinazione della radianza normalizzata permette di semplificare notevolmente l'analisi dei dati e evita complesse procedure di calibrazione dello strumento. Per ottenere tale grandezza è necessario misurare anche la radianza diretta del Sole. La scelta del sensore deve dunque tener conto di questa necessità.

Conoscendo la radianza del cielo si può ricavare la potenza incidente sul sensore dello strumento tramite la seguente relazione:

$$P = Rad * S * \Omega * \Delta\lambda$$

dove Rad è la radianza del cielo, S è la superficie della pupilla d'entrata dello strumento, Ω è l'angolo solido sotteso e $\Delta\lambda$ la banda spettrale. Per esempio, alle precedenti radianze simulate e con la geometria del sistema precedentemente determinata corrispondono le seguenti potenze:

Potenze espresse in:

mW

Valore di β	$\beta = 0.02$	$\beta = 0.5$
Canale 400 nm	$19 * 10^{-5}$	$101 * 10^{-5}$
Canale 500 nm	$13 * 10^{-5}$	$126 * 10^{-5}$
Canale 675 nm	$5 * 10^{-5}$	$90 * 10^{-5}$
Canale 870 nm	$2 * 10^{-5}$	$49 * 10^{-5}$
Canale 1020 nm	$0.9 * 10^{-5}$	$30 * 10^{-5}$

La potenza che incide sul sensore durante la misura del Sole diretto si ottiene dal valore di picco dello spettro ideale, cioè quello spettro che si misurerebbe a terra in presenza di un'atmosfera ideale perfettamente limpida, senza nessun contributo all'estinzione luminosa degli aerosol. Questo è il limite superiore di irradianza. In generale le misure avverranno con flussi inferiori. Il valore di picco dello spettro, che si situa attorno a 500 nm, vale:

$$E^{dir} = 1.7 \frac{W}{m^2 nm}$$

e la corrispondente potenza sul sensore di ARBOL sarà data da:

$$P = E^{dir} * S * \Delta\lambda$$

Inserendo i valori numerici, si ottiene:

$$P = 8.3mW$$

Come sensore si è optato per dei fotodiodi al silicio. I fotodiodi godono del vantaggio di avere un range dinamico molto esteso, con correnti proporzionali alla luce incidente in un range di potenze compreso tra 10^{-12} e 10^{-2} W.

ARBOL potrà quindi osservare sia il Sole, sia il cielo con lo stesso sensore. Questo garantisce una maggiore facilità nei processi di calibrazione dello strumento.

In particolare sono stati scelti due differenti modelli di fotodiiodo: il modello S5107 e il modello S1337. I due modelli possiedono caratteristiche comuni:

- Una risposta spettrale apprezzabile tra 320 nm e 1100 nm: i canali di osservazione di ARBOL sono tutti in questo intervallo spettrale,
- Una grande superficie attiva, pari a 1 cm²,
- Un'efficienza di conversione (photosensitivity) elevata e con dipendenza spettrale vantaggiosa per l'applicazione specifica: maggiore sensibilità a lunghezze d'onda in cui c'è meno luce diffusa e viceversa (Figura 5.4).

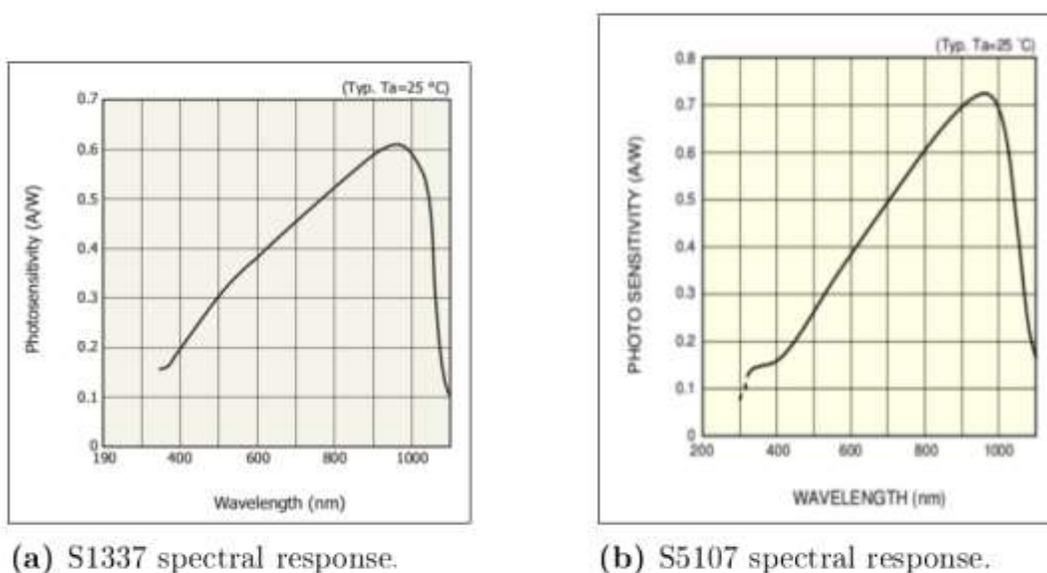


Figure Comparison between S1337 and S5107 spectral responses

Figura 5.4: Efficienze spettrali dei fotodiiodi prescelti e discussi nel testo.

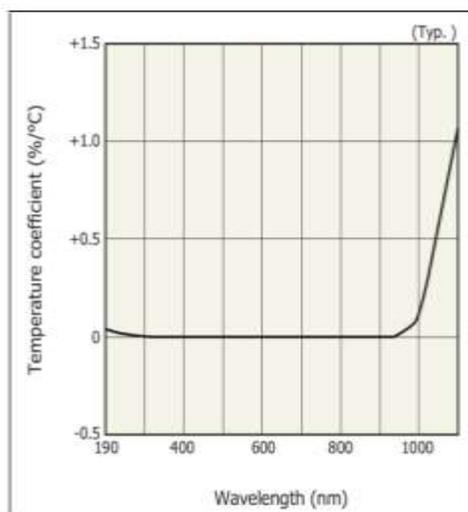
Tuttavia vi sono anche differenze: la curva di sensibilità del modello S5107 è più stretta e di conseguenza più sensibile tra 600 e 1100nm rispetto all'altro modello. Un'altra importante differenza è la sensibilità alle variazioni di temperatura. Minore è la sensibilità, maggiore risulta la stabilità della misura. Si è verificato che il modello S1337 presenta una minore sensibilità nei range spettrali del vicino infrarosso: per questo motivo si è scelto di utilizzare due modelli diversi: S1337 permette una maggiore stabilità elettronica. A tal proposito si veda la figura 5.5: al di sopra di 1000nm la curva relativa al fotodiiodo S1337 presenta la caratteristica appena discussa.

Il data-sheet del modello S5107 si trova all'indirizzo:

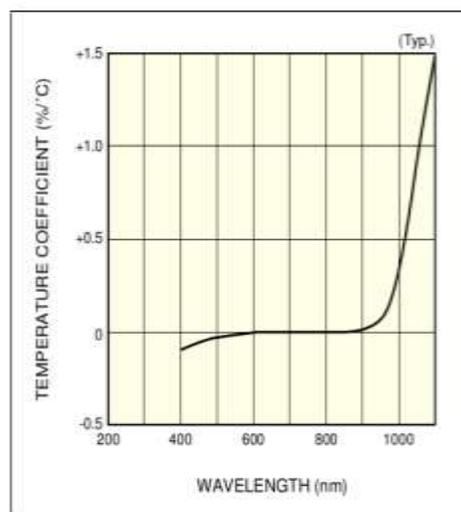
http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s5106_etc_kpin1033e.pdf

mentre per il modello S1337 l'analogo documento è disponibile qui:

https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s1337_series_kspd1032e.pdf



(a) S1337



(b) S5107

Figure Comparison between S1337 and S5107 photosensitivity temperature characteristics

Figura 5.5: Confronto tra le variazioni percentuali delle risposte spettrali di figura 5.4 al variare della temperatura.

A partire dal valore della photosensitivity dei sensori (che varia a seconda del canale considerato), e dalle potenze stimate in arrivo sul fotodiodo, è possibile ricavare la corrente generata:

Correnti espresse in:

mA

Valore di β	$\beta = 0.02$	$\beta = 0.5$
Canale 400 nm	$30 * 10^{-6}$	$162 * 10^{-6}$
Canale 500 nm	$34 * 10^{-6}$	$328 * 10^{-6}$
Canale 675 nm	$24 * 10^{-6}$	$432 * 10^{-6}$
Canale 870 nm	$14 * 10^{-6}$	$333 * 10^{-6}$
Canale 1020 nm	$6 * 10^{-6}$	$186 * 10^{-6}$

Dai valori di corrente ricavati è possibile notare l'effetto di compensazione della poca luce dovuto alla maggiore sensibilità del sensore a lunghezze d'onda più grandi.

Per quanto riguarda il calcolo delle correnti in regime di osservazione del Sole, i conti sono stati svolti solamente in due canali: a 500 nm e a 870 nm. Le correnti previste sono le seguenti:

$$I_{500nm} = 2mA \text{ e } I_{870nm} = 3mA$$

Come si può notare, il rapporto tra le correnti generate durante l'osservazione del Sole e quelle del cielo è pari a cinque ordini di grandezza, che possono diventare quattro in presenza di cieli molto carichi di aerosol ($\beta= 0.5$) e quindi più luminosi.

Scelta del Convertitore Corrente-Tensione

La corrente generata dal fotodiodo deve essere convertita in tensione per poi essere digitalizzata. Di conseguenza la configurazione circuitale prescelta è quella di un amplificatore in transimpedenza:

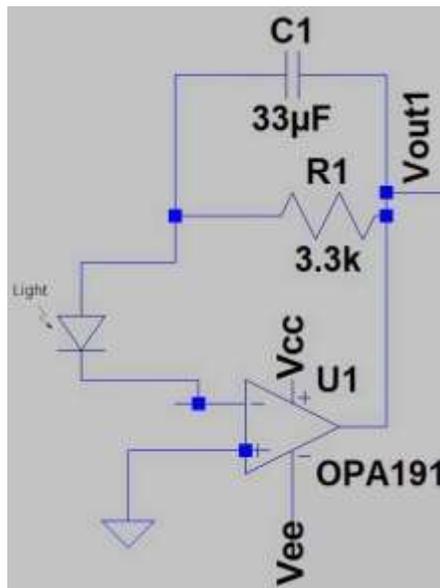


Figura 5.6: progettazione tramite Ltspice dell'amplificatore in transimpedenza. V_{out1} è la tensione in uscita dal circuito, proporzionale alla corrente generata dal fotodiodo secondo la relazione: $V_{out1} = -R_1 * I_d$ dove I_d è la corrente generata dal fotodiodo.

Questo circuito presenta alcuni importanti vantaggi:

- La presenza della retroazione negativa comporta una resistenza in ingresso dell'anello pari a: $R_L = \frac{R_f}{A}$, dove A è il guadagno ad anello aperto dell'amplificatore operazionale. Poiché il limite di saturazione è inversamente proporzionale al valore della resistenza di carico, ne consegue che l'accoppiamento fotodiodo-operazionale permette un'importante estensione del range di linearità del sensore.
- Il fotodiodo può essere utilizzato in modalità fotovoltaica anche con guadagni di transimpedenza elevati. Rispetto alla modalità fotoconduttiva, questo utilizzo del sensore comporta l'assenza di dark current generata dal fotodiodo, e quindi livelli di rumore molto bassi dovuti unicamente agli altri componenti del circuito (operazionale e resistenza).

Nel contempo la presenza dell'amplificatore nel circuito comporta lo svantaggio di dover fornire un'alimentazione. Nella sezione precedente si è visto come l'intensità della luce che ARBOL deve osservare varia di cinque ordini di grandezza.

L'elevata estensione del range dinamico costituisce una sfida tecnologica non banale, perché il front end elettronico deve restituire una tensione misurabile (tra 10V e 10mV), compresa al massimo in tre ordini di grandezza. Per restringere il range del segnale due soluzioni circuitali sono state testate:

- l'utilizzo di un secondo stadio di amplificazione. Allo stadio a transimpedenza mostrato nella precedente figura è stato quindi aggiunto uno stadio di amplificazione in configurazione invertente.

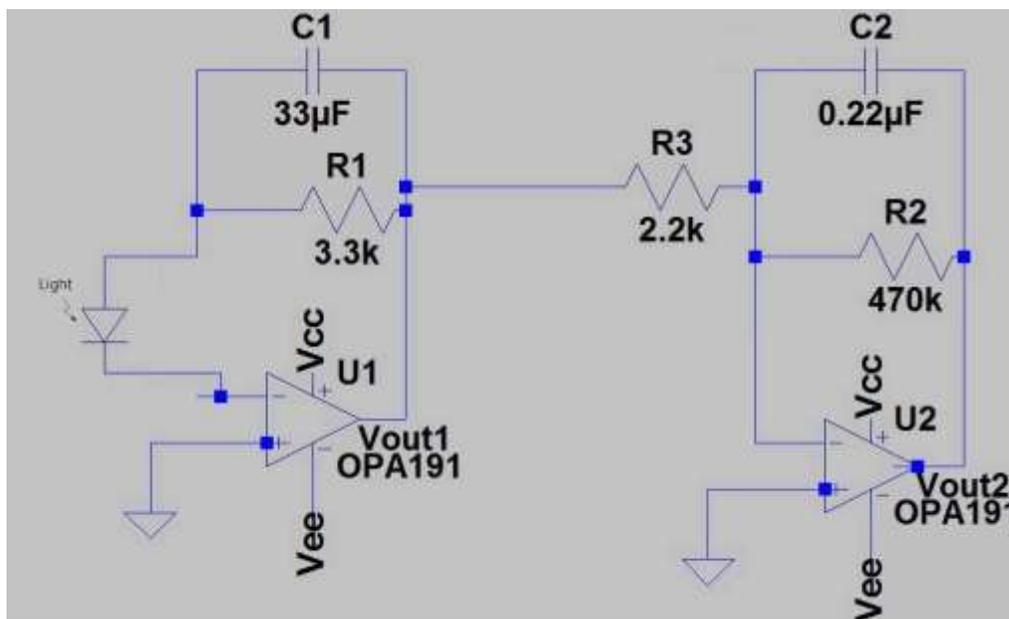


Figura 5.7: progettazione tramite Ltspice del front end analogico di ARBOL, effettuata tramite LTspice. V_{out1} è la tensione in uscita dal primo stadio, mentre V_{out2} l'uscita dal secondo stadio. Rispetto all'uscita del primo stadio, V_{out2} risulta amplificata in modo tale che:

$$V_{out2} = \frac{-R_2}{R_3} V_{out1}$$

- l'utilizzo di uno switch per fissare un valore di guadagno appropriato. Quest'ultimo viene selezionato in base all'intensità della luce incidente sul sensore.

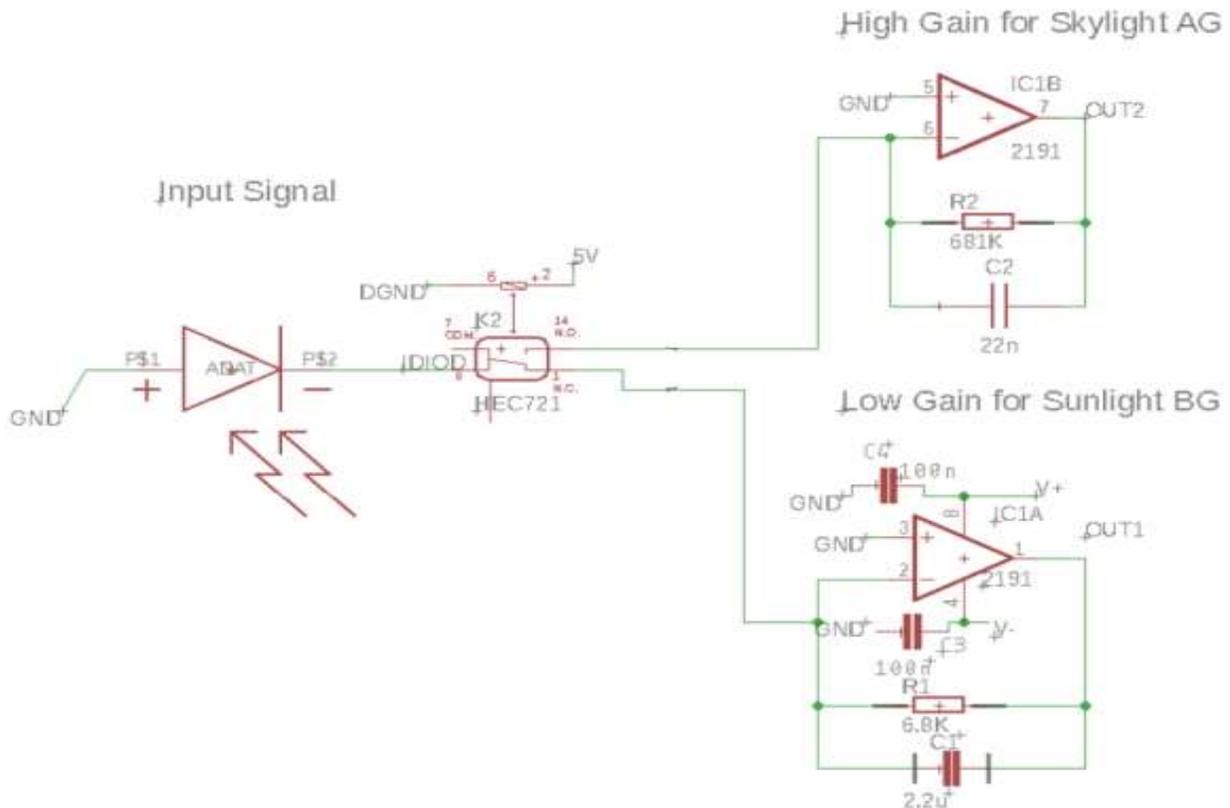


Figure Front end schematic for the light measuring circuit.

Figura 5.8: progettazione tramite Eagle del front end analogico di ARBOL. OUT1 è la tensione in uscita dal circuito a basso guadagno, mentre OUT2 l'uscita dal circuito ad alto guadagno. Lo switch seleziona il guadagno migliore per la misura in atto.

A seguito di numerosi tests è stata selezionata quest'ultima soluzione che offre una maggiore affidabilità di misura.

Come si vede dalle progettazioni, si è rivelato ideale il modello di amplificatore operazionale OPA191, più precisamente la sua versione duale OPA2191, della Texas Instruments.

Questo componente elettronico, accuratamente selezionato, presenta i seguenti vantaggi:

- Una configurazione duale, che integra due amplificatori nello spazio di uno solo
- L'esistenza di una versione con layout SMD (per la precisione il suo package è di tipo SOIC-8)
- Un guadagno ad anello aperto, per basse frequenze, pari a 110 dB
- Un input offset voltage piuttosto basso nel range tra -40 e +125 °C: $V_{os} = \pm 10 \mu V$
- Un basso drift termico: $\frac{dV_{os}}{dT} = \pm 0.15 \frac{\mu V}{^{\circ}C}$
- Piccole correnti di bias: $I_b = \pm 5 pA$
- Una bassa densità di rumore: $E_n = 18 \left(\frac{nV}{\sqrt{Hz}} \right)$

Tutte queste specifiche tecniche nel complesso rendono il modello OPA2191 estremamente poco rumoroso, stabile in temperatura e poco voluminoso.

Il data-sheet del modello di amplificatore selezionato può essere trovato all'indirizzo:

<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa191.pdf>

Schema circuitale di front end

Nella sezione precedente si è accennato al fatto che lo schema del circuito adottato in definitiva è quello di figura 5.8. In questo circuito, la corrente generata dal fotodiodo viene reindirizzata in uno dei due convertitori corrente-tensione tramite un relé di tipo SPDT. In questo modo il segnale incontra il corretto valore di guadagno sia nel caso della debole luce del cielo sia in quello dell'intensa radiazione del Sole. Lo switch è controllabile via software tramite un segnale digitale a 5V.

A differenza del circuito di figura 5.7, questa configurazione permette di discriminare tra il segnale e l'offset dell'amplificatore operazionale perché l'amplificatore a transimpedenza possiede la capacità di amplificare la corrente (che in questo caso coincide con il segnale), ma ha guadagno unitario per la tensione in ingresso (che in questo caso coincide con l'offset tra gli ingressi dell'operazionale). Grazie a questo fatto con questo secondo progetto di front end non è più richiesta la stabilità della tensione di offset.

Sulla stessa scheda è integrato un sistema per il monitoraggio della temperatura del sensore. Questo sistema si basa sull'utilizzo di un termistore messo a ridosso del fotodiodo in contatto con la massa della scheda.

Progettazione della PCB

Dopo aver determinato lo schema circuitale è stata effettuata una dettagliata progettazione della disposizione dei vari componenti elettronici. Ciascuna cartuccia dovrà contenere una PCB dedicata, con lo schema circuitale mostrato poco sopra. Di conseguenza lo spazio disponibile per i componenti si limita ad un disco di diametro 35 mm, coincidente entro tolleranze con i diametri interni dei cilindri delle cartucce. Il disco viene posto perpendicolare all'asse del cilindro di ARBOL. Sulla faccia superiore del disco, rivolta verso la luce del Sole, si trova il sensore a fotodiodo mentre sull'altro lato vengono saldati i resistori, i condensatori, l'amplificatore e i connettori.



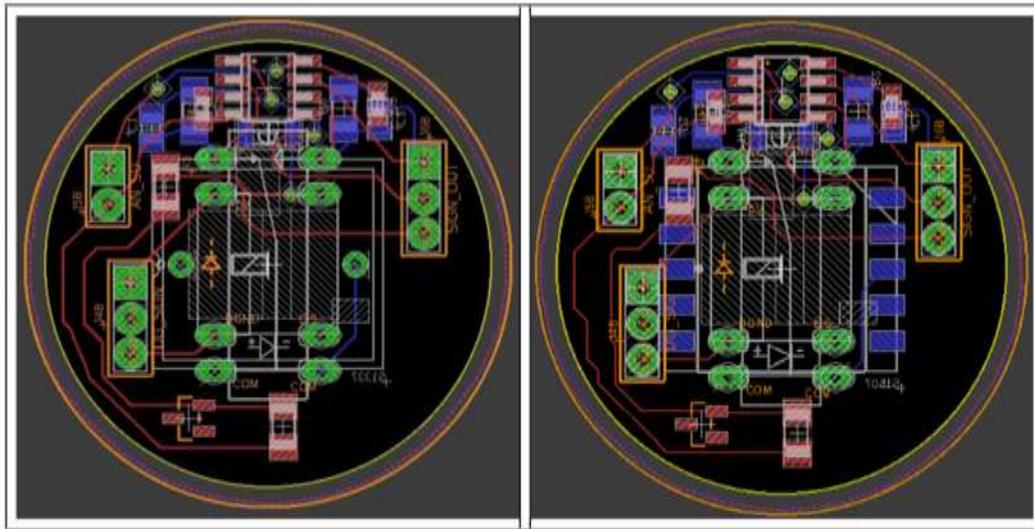
Unione europea



PROGRAMMA INVESTIMENTI
PER LA CRESCITA E L'OCCUPAZIONE
FONDO EUROPEO DI SVILUPPO REGIONALE
Sviluppo regionale 2014-2020



PROGRAMMA INVESTIMENTI
IN FAVORE DELLA CRESCITA
E DELL'OCCUPAZIONE
FONDO SOCIALE EUROPEO
2014-2020



(a) PCB carrying S5107 photodiode

(b) PCB carrying S5107 photodiode

Figure PCB design boards, based on Eagle PCB design software

Figura 5.9: disposizione dei componenti elettronici e disegno delle piste per il front end analogico di ARBOL. Il circuito è contenuto in un disco di 35 mm di diametro.

Secondo il progetto di figura 5.8, su ogni scheda si trova un relé. Tale componente è un relé di tipo reed modello HE721C0510 Hamlin. L'utilizzo di uno switch elettromeccanico possiede un grosso vantaggio: non presenta le correnti di perdita caratteristiche dei dispositivi a stato solido, che potrebbero andare a disturbare le piccole correnti prodotte dal sensore a fotodiode.

Alimentazioni / Centralina di controllo

ARBOL necessita di due diverse alimentazioni: un'alimentazione duale $\pm 12V$ per i segnali analogici e un'altra a 5V per i segnali digitali. ARBOL possiede inoltre una centralina di controllo dello strumento in cui sono integrati:

- la scheda di acquisizione NI-USB6210, il cui compito è quello di digitalizzare i segnali analogici provenienti dai vari canali spettrali



Unità di Ricerca GAIA "Geocaratterizzazione Integrata di Aerosol"

CINFAI – Consorzio Interuniversitario Nazionale per la Fisica delle Atmosfere e delle Idrosfere, organismo di ricerca di diritto pubblico - Capofila

Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente – ARPA VdA, amministrazione pubblica - Partner

Envisens Technologies Srl, impresa - Partner

Fondazione Clément Fillietroz-ONLUS, organismo di ricerca - Partner

Sede principale: Via Lavoratori Vittime del Col du Mont, 28 - 11100 AOSTA

CUP B36G15002270006

- i regolatori di tensione modello LM317 e LM337, che abbassano la tensione da 12V a 10V e da -12V a -10V rispettivamente.
- il circuito relay driver, che fornisce la corrente necessaria per comandare tutti e 12 i relé dello strumento (2 per 6 tubi). Tale circuito si basa sull'utilizzo del transistor BD139.

Grazie alla presenza dei regolatori di tensione ARBOL può essere alimentato a $\pm 12V$ senza correre il rischio che i segnali di tensione analogica superino i 10V, limite oltre il quale la scheda di acquisizione non è più in grado di digitalizzare.

La centralina di controllo risulta essere solidale allo strumento. Questo fatto semplifica di molto il cablaggio perché i cavi in uscita dai cilindri di misura ruotano anch'essi con ARBOL stesso.

Sistema monitoraggio della temperatura

Il sistema di monitoraggio della temperatura è un partitore di tensione dotato di un resistore variabile a seconda della temperatura. Il controllo in temperatura risolve possibili bias nell'elettronica introdotti da variazioni di temperatura ambientale.

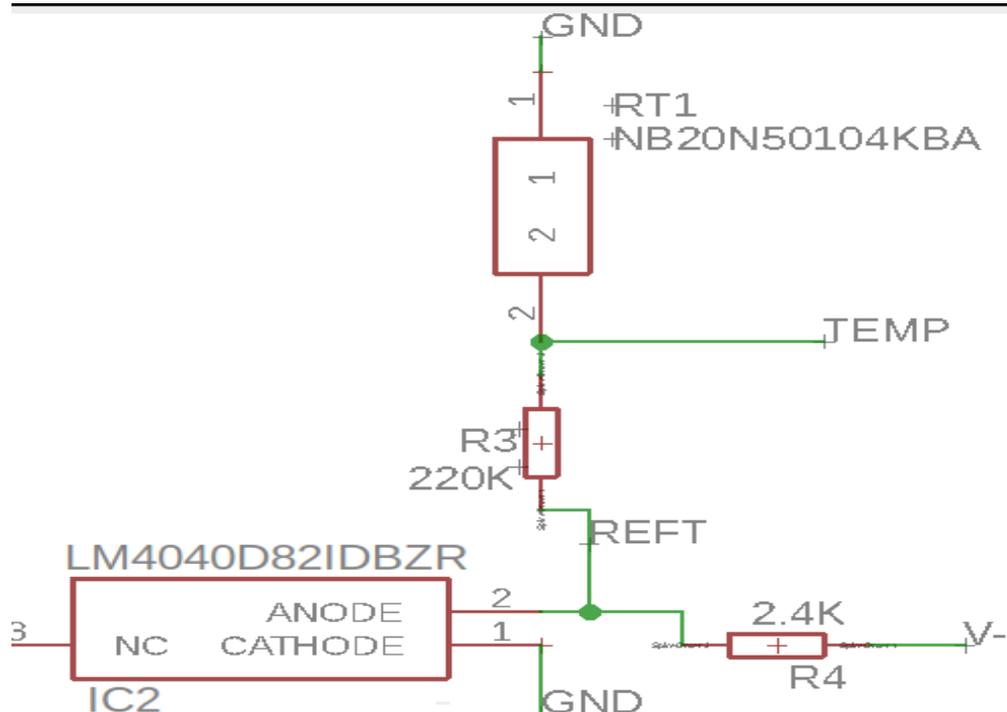


Figura 5.10: progetto del sistema di monitoraggio della temperatura, integrato sulla front end PCB di ARBOL.

Più precisamente il termistore è il modello NB20N50104KBA, che presenta un valore nominale di resistenza a 25°C pari a $R_{th}=100\text{ K}\Omega$ ed un coefficiente $\beta=4160\text{ K}$. Il valore della resistenza fissa è stato scelto tramite alcune simulazioni in modo da linearizzare il segnale di tensione uscente. Tale resistenza è pari a $R_{th}=220\text{ K}\Omega$. Siccome il partitore viene alimentato tra la terra analogica del Front End e -8.192V, valore ottenuto utilizzando il riferimento di tensione LM4040D82IDBZR della Texas Instruments, la tensione di uscita del sistema è negativa. Grazie

alla presenza del riferimento di tensione il circuito risulta essere indipendente da possibili effetti di carico che potrebbe subire l'alimentazione analogica a -10 V, rappresentata in figura 2.4 dal nodo "V-". Il riferimento è stato posto tra il nodo di terra e il nodo denominato nello schema "REFT" in maniera tale che quest'ultimo nodo sia sempre mantenuto a -8.192V. La tensione approssimativamente proporzionale alla temperatura invece è presa dal nodo "TEMP".

5.6. Caratterizzazioni Strumentali

Calibrazione Bolometrica

La luce osservata da ARBOL viene convertita in un segnale di corrente dal fotodiode e in una differenza di potenziale dal sistema di preamplificazione. Questo segnale deve tuttavia essere in un range di tensioni ben preciso, determinato dalla capacità di convertire segnali analogici in segnali digitali del microcontrollore NI-USB6210 della National Instruments. Più precisamente la tensione analogica in uscita dalla preamplificazione a transimpedenza deve essere compresa tra 0 e 10V. Per rispettare queste specifiche è necessario selezionare un valore di guadagno del circuito a transimpedenza in base a quanta luce arriva sul sensore e quindi conoscere l'intensità della radiazione incidente sull'elemento sensibile.

Osservazioni del Sole per tempi che variano tra poche decine di minuti fino a più di 1 ora sono state svolte durante i giorni 17 e 18 Luglio 2018 dal cortile dell'Università degli Studi di Milano. Lo scopo delle osservazioni è quello di calibrare e testare sul campo il valore della conversione corrente-tensione, che coincide con il valore della resistenza di retroazione R_f nel circuito di front end. Questa caratterizzazione è particolarmente importante nel regime di osservazione del Sole, dove la luce osservata è più intensa. Un'iniziale valore di R_f è stato assunto per le misure: $R_f = 3.3 \text{ K}\Omega$. Un singolo telescopio dello strumento definitivo è stato montato su un tracker in grado di inseguire il Sole tramite effemeridi. La tensione in uscita dal circuito analogico è stata digitalizzata e registrata.

La massima tensione osservata durante il periodo di misura è il dato più utile per la calibrazione. In figura 5.11 è riportato in verde il valore massimo di ciascuna serie di dati osservata assieme all'ora del giorno (ora locale) di inizio della raccolta dati. In rosso invece è riportato lo scostamento del valor medio della serie di dati dal valore massimo: maggiore tale scostamento, maggiore il disturbo nella misura. Questo disturbo può essere causato da vari fattori: passaggi nuvolosi, disallineamento nell'inseguimento, etc...

Dalla figura mostrata si può notare come per nessun canale spettrale il segnale sia mai andato al di sopra di 4V, sebbene le condizioni della giornata di misura fossero tale da presentare un soleggiamento che ci aspettiamo essere circa il massimo possibile. Infatti le giornate di osservazione hanno presentato un tempo atmosferico sereno; sono giornate a poche settimane dal solstizio d'estate in cui il Sole è massimamente alto sopra l'orizzonte e tutte le serie di dati sono state raccolte durante le ore centrali della giornata. La principale conclusione che si può

trarre dai dati presentati quindi è che è possibile tranquillamente raddoppiare il valore di R_f , rimanendo comunque al di sotto della soglia dei 10V di tensione.

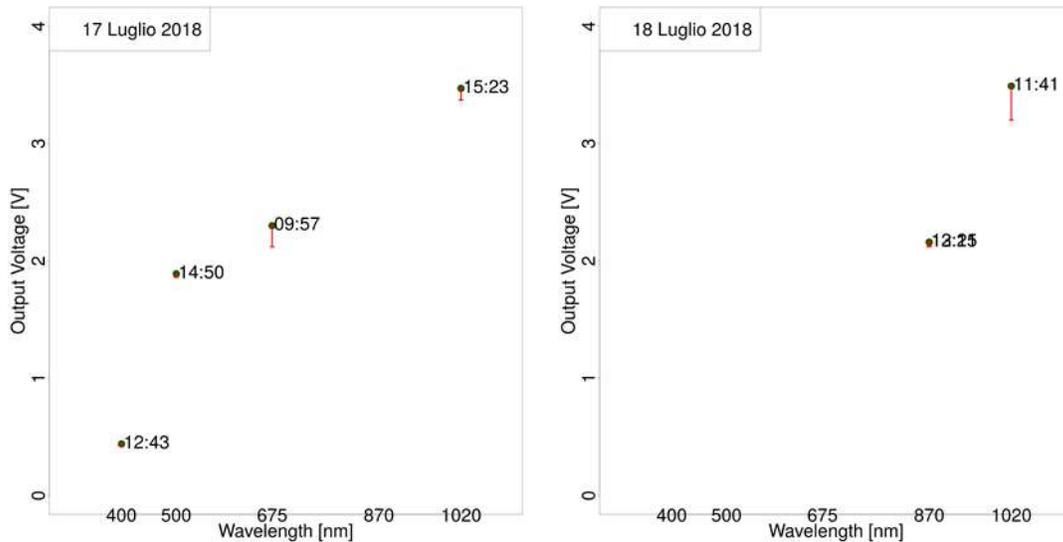


Figura 5.11: risultati della calibrazione bolometrica effettuata durante le giornate 17-18 Luglio 2018

Di conseguenza lo stadio di front end di ARBOL per l'osservazione del Sole verrà settato su un valore pari a $R_f = 6.8\text{K}\Omega$, doppio rispetto a $R_f = 3.3\text{K}\Omega$.

In secondo luogo la figura 5.11 evidenzia come tutti i canali siano su valori di tensione agilmente rilevabili dalla scheda NI-USB6210 (il più basso, la banda blu a 400 nm, con $R_f = 6.8\text{K}\Omega$ vedrà circa 0.8V): per questa ragione la selezione del valore di R_f sarà uguale per tutte le lunghezze d'onda.

Anche la luce del cielo è stata misurata in alcuni test svolti. A seguito dei tests è stato deciso di assumere un guadagno pari a $R_f = 680\text{K}\Omega$ per il circuito che deve osservare la radiazione proveniente dal cielo. A causa di problemi di stray light durante i tests il valore $R_f = 680\text{K}\Omega$ trovato è passibile di ulteriore revisione.

Calibrazione angolare dei sensori

La posizione del Sole all'interno del campo di vista di ARBOL (FOV) influisce sulla qualità della misura. Di conseguenza si rende necessaria una calibrazione angolare del FOV dello strumento. Per effettuare la caratterizzazione è necessario agire sul software del telescopio inseguitore di ARBOL. Ricordiamo che il meccanismo di puntamento è un feedback che modifica la direzione puntata cercando di rendere minima la differenza tra i segnali dei 4 quadranti del sensore QPD. Più precisamente le differenze da minimizzare sono:

$$(NW+NE)-(SW+SE)$$

per la direzione verticale, e:

(NW+SW)-(NE+SE)

per quella orizzontale. Nelle equazioni qui sopra i punti cardinali (NW, NE, SW e SE) sono stati utilizzati per indicare i segnali registrati da ciascun quadrante del QPD, già digitalizzati.

La caratterizzazione può essere svolta inserendo offsets fittizi nelle differenze sopra riportate. In questo modo, considerando il riferimento del campo di vista di un telescopio di ARBOL, il Sole ne viene spostato al suo interno in maniera controllata: se si aggiunge un offset alla prima differenza si cambia la posizione del Sole nel FOV in direzione Nord-Sud, nell'altro caso in direzione Est-Ovest.

Al variare dell'offset inserito nelle differenze qui sopra è stato acquisito un segnale corrispondente.

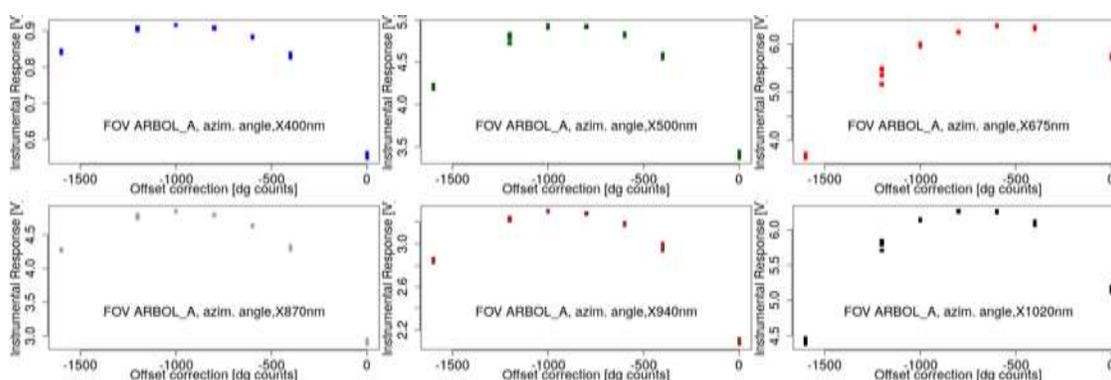


Figura 5.12: risultati della calibrazione angolare sulla direzione azimutale di ARBOL_A.

La Figura 5.12 mostra le curve di campo di vista per ciascun telescopio (cioè per ciascuna lunghezza d'onda) di ARBOL_A, lo strumento installato presso l'osservatorio astronomico. Queste curve si riferiscono al puntamento in azimuth del Sole. Curve analoghe sono state ottenute per il puntamento in altezza del Sole dello stesso strumento e per entrambe le direzioni dello strumento installato in ARPA, ARBOL_B. In tal modo il campo di vista di entrambi gli strumenti è stato caratterizzato.

Tutte le caratterizzazioni mostrano la presenza di un massimo: questa condizione corrisponde a quella in cui il Sole è massimamente centrato nel campo di vista. Per ottimizzare le misure allora è necessario adottare l'offset correttivo corrispondente al massimo come correzione del software del centratore, cosa che è stata fatta per entrambi gli strumenti.

Calibrazione bolometrica in camera climatica

Scopo di questa calibrazione è quello di studiare la risposta dell'elettronica di ARBOL al variare della temperatura. Quest'ultima può affliggere le performances strumentali introducendo bias nelle misure stesse.

Dato un telescopio di ARBOL, l'elemento elettronico sensibile a variazioni di temperatura è il sensore a fotodiode stesso. Normalmente quindi si possono tenere due approcci:

- progettare un sistema di misura della temperatura dell'elettronica per monitorarne l'evoluzione in ambiente esterno, durante il normale funzionamento.
- effettuare una caratterizzazione della risposta del fotodiode ad una luce costante in ambiente controllato (la camera climatica)

Nel nostro caso si è deciso di seguire il primo approccio, escludendo il secondo, per varie ragioni:

- il fornitore del fotodiode, Hamamatsu, ha fornito una curva di variazione di sensibilità al variare della temperatura già estremamente accurata. La caratterizzazione principale dunque è già stata svolta dal fornitore.
- è stato visto che soltanto la lunghezza d'onda 1020nm è afflitta dalla temperatura
- è stato verificato che una precisione nella misura della temperatura di circa 2°C è sufficiente per correggere la misura di ARBOL.

In conclusione quindi è stato progettato un partitore di tensione che integra al suo interno un termistore. Quest'ultimo è l'elemento termicamente sensibile ed è stato posto a contatto con il fotodiode in modo da ottimizzare l'accuratezza della misura. La figura 5.10 mostra lo schema del partitore di tensione: dal nodo indicato con la sigla "TEMP" viene misurato un output in tensione che risulta proporzionale alla temperatura.

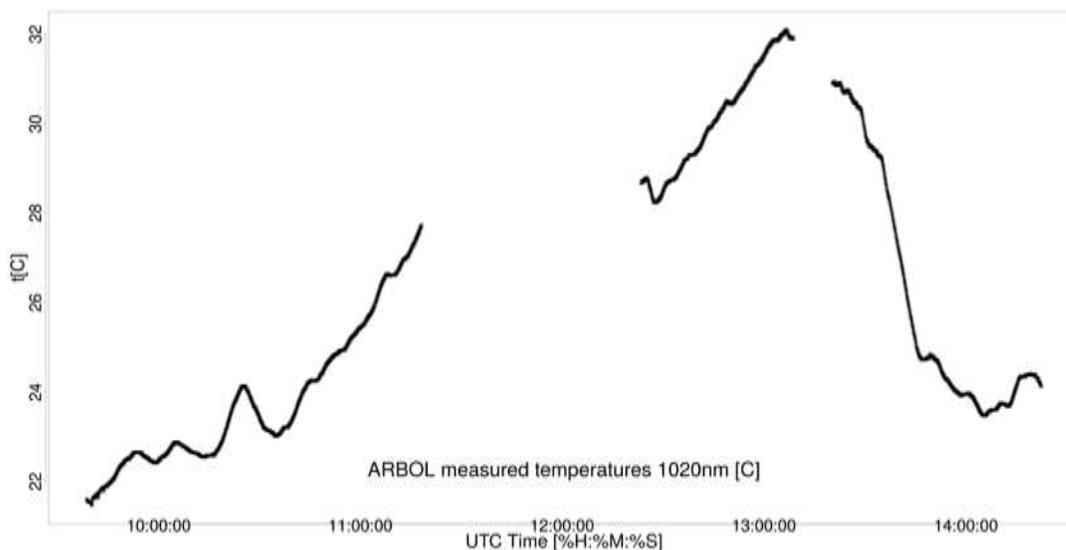


Figura 5.13: misura della temperatura per il giorno 17 Giugno 2019

Di seguito viene mostrato un giorno di misura di ARBOL in cui risulta chiaramente distinguibile un bias causato dalla variazione diurna della temperatura e la correzione che è stata apportata. Figura 5.12 mostra la variazione giornaliera di temperatura misurata dal partitore di tensione interno al telescopio di ARBOL: per quel giorno la temperatura è passata da 22°C (al mattino, prima delle 10 UTC) a 32°C (appena dopo le 13 UTC). La figura 5.14 mostra invece il segnale generato dalla misura della luce diretta del Sole a 1020nm: la forma della curva durante la

giornata ricorda chiaramente quella della temperatura. In particolare appena dopo le 13 UTC si osserva la presenza di un massimo sia nel plot 5.13, sia nel 5.14, tuttavia per le altre lunghezze d'onda misurate in simultanea (che non sono disturbate dalla temperatura) quel massimo non c'è. Questo fatto è un chiaro sintomo della presenza del bias di temperatura che ha modificato la sensibilità del fotodiodo. Grazie alla misura di temperatura ed alla correzione della sensibilità del fotodiodo fornita da Hamamatsu, risulta possibile correggere il bias osservato. Il risultato della correzione viene riportato in figura 5.15. Si può notare da quest'ultima figura come l'andamento imposto dal disturbo scompaia completamente: la correzione alla sensibilità del fotodiodo elimina ogni traccia di errore sistematico introdotto dalla temperatura ambientale che cambia durante il funzionamento di ARBOL. In conclusione questo tipo di monitoraggio in tempo reale della temperatura del sensore a fotodiodo di ARBOL e conseguente applicazione del fattore correttivo fornito da Hamamatsu permette di effettuare misure affidabili, indipendentemente dall'evoluzione della temperatura ambientale.

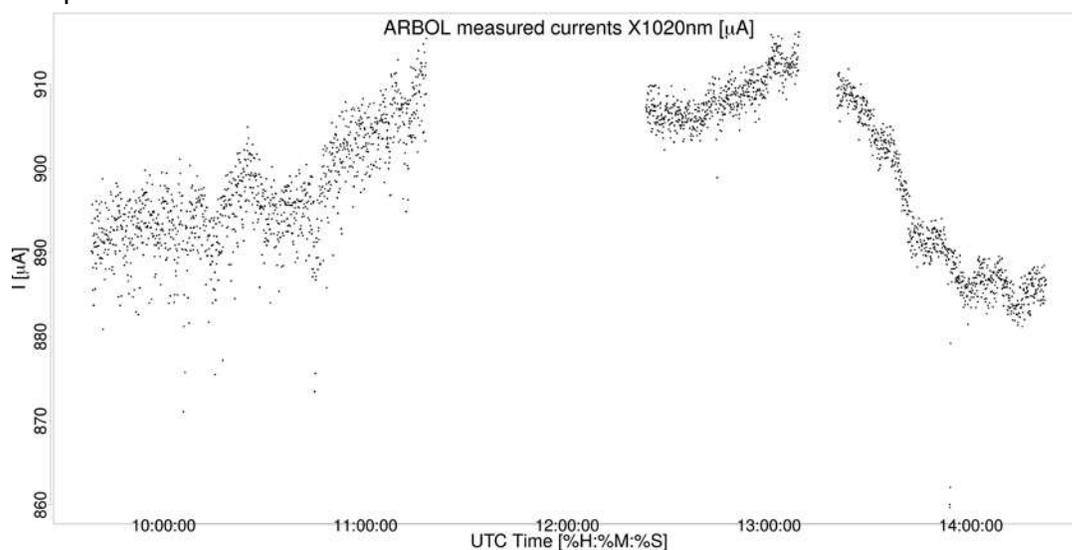


Figura 5.14: misura della fotocorrente per il giorno 17 Giugno 2019, senza alcuna correzione

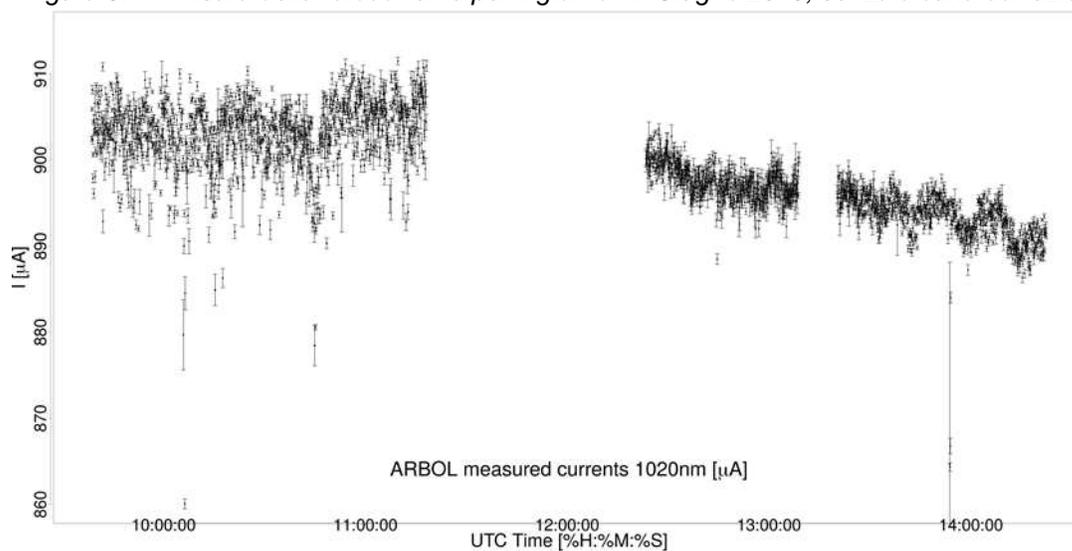


Figura 5.15: misura della fotocorrente per il giorno 17 Giugno 2019 dopo la correzione.

5.7. Codici per l'analisi del dato di ARBOL

Codici per l'acquisizione e l'analisi dati di ARBOL sono stati scritti e testati sul campo. Il software di acquisizione di ARBOL si basa sul linguaggio C++ ed integra le API del microcontrollore NI USB6210 con alcuni tools, in particolare Qt e QCustomPlot, utili per offrire un'interfaccia grafica user-friendly. Senza dilungarci in dettagli eccessivamente tecnici, il software (che è stato appositamente creato per ARBOL) offre un'interfaccia di semplice utilizzo, che permette all'utente di osservare in tempo reale che cosa ARBOL sta osservando.

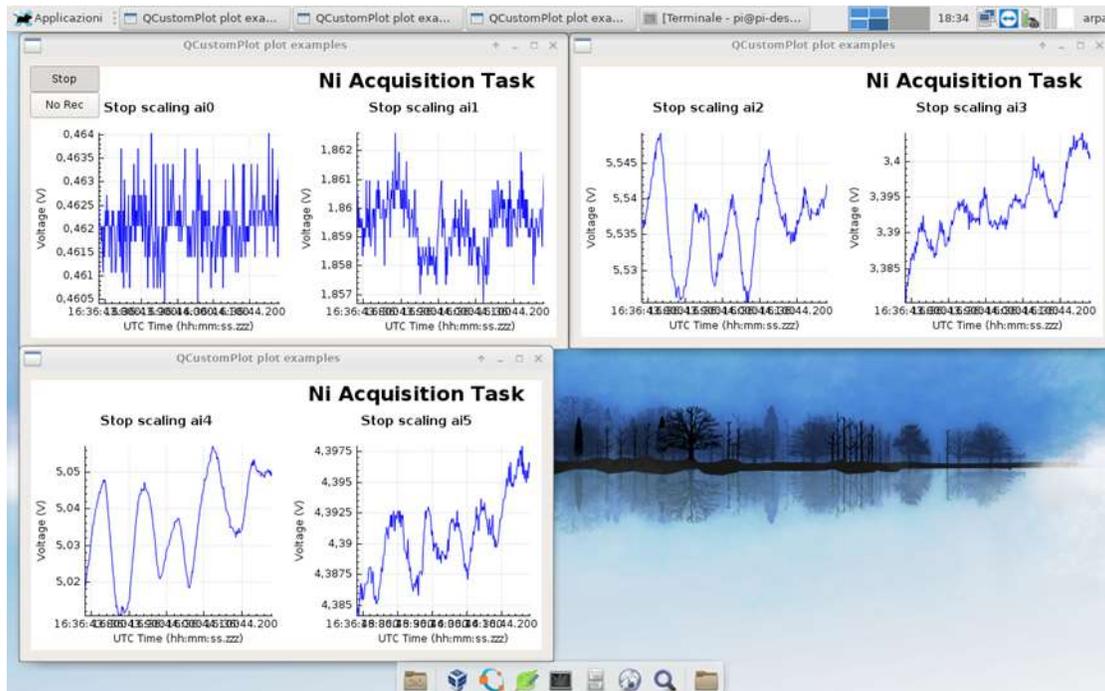


Figura 5.16: esempio dell'interfaccia grafica di ARBOL. I sei grafici mostrano ciascuno l'osservazione di un singolo telescopio (e quindi una singola lunghezza d'onda) dello strumento in real-time.

Il dato di fotocorrente viene in seguito registrato e può essere analizzato. Appositi scripts basati sul linguaggio "R" sono stati realizzati per estrarre lo spessore ottico di aerosol (AOD) a partire dalla misura di ARBOL. Una volta che lo strumento è stato calibrato, l'AOD può essere ricavato con relativa facilità. L'analisi si basa sull'equazione di Lambert-Beer, che mette in relazione il dato misurato con i fattori di trasmissione atmosferici:

$$I = I_0 e^{-AM_{aer} \times \tau_{aer}} e^{-AM_{ray} \times \tau_{ray}} e^{-AM_{O_3} \times \tau_{O_3}}$$

Nell'equazione qui sopra ciascuna trasmittività si riferisce ad un diverso fenomeno:

- l'assorbimento dell'ozono è indicato con il pedice "O3"
- lo scattering generato dalle molecole d'aria con il pedice "ray"

- l'estinzione dovuta alla presenza degli aerosol viene individuata dal pedice "aer"

Sia l'assorbimento da ozono, sia lo scattering da molecole d'aria viene ricostruito dagli script di "R". I programmi sono istruiti con leggi empiriche appropriate. Queste ultime partono da misure ancillari di ozono e pressione atmosferica, rispettivamente. Nel contempo la costante extra-atmosferica, I_0 , che è nota a partire dal processo di trasferimento di calibrazione con il fotometro POM di riferimento, viene selezionata per il giorno di misura in corso.

Per ricavare lo spessore ottico τ_{aer} rimane necessario ricostruire il fattore geometrico AM_{aer} , detto di air mass, ma che non è legato ad alcun fattore fisico, bensì puramente alla posizione del Sole. Anche in questo caso sono gli script di analisi dati che calcolano l'elevazione dell'astro sopra l'orizzonte e quindi il fattore di air mass a partire dall'ora e dalla coordinata geografica del sito di misura.

Noti tutti questi fattori l'equazione di Lambert-Beer può essere utilizzata per isolare lo spessore ottico di aerosol, grandezza direttamente collegata al carico di particolato e alla torbidità atmosferica.

5.8. Installazione degli strumenti presso le stazioni di osservazione

ARBOL è stato integrato in un unico dispositivo assieme ad SRS ed al tracker, sviluppato in quest'ultimo progetto. A tutto il sistema è stato aggiunto un ulteriore box in cui è stato inserito un alimentatore PSU switching. Quest'ultimo possiede il vantaggio di fornire tutte le tensioni necessarie ad ARBOL per un corretto funzionamento: si rivela dunque come una soluzione compatta ed economica per risolvere il problema delle diverse alimentazioni dello strumento. In quest'ultimo box sono anche stati inseriti i controlli dei motori del tracker. Tutto il box è stato montato corotante con ARBOL.

Opportuni contrappesi sono stati inseriti all'interno del box citato e nei pressi di ARBOL per fornire il bilanciamento meccanico dei due assi del tracker.



Figura 5.17: i due ARBOL installati presso ARPA VdA (a sinistra) e presso l'OAVdA (a destra) durante una giornata di normale funzionamento. Da notare sul lato sinistro rispetto allo strumento la presenza del box contenente l'alimentatore, i controlli motori.

6. SRS: DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ E DEI RISULTATI

Al fine di una migliore comprensione dell'apporto tecnico, scientifico e del corrispondente trasferimento tecnologico, di seguito si dettaglia l'attività svolta in maniera trasversale rispetto ai WP, che sono stati analizzati precedentemente.

6.1. Definizione di requisiti e specifiche per SRS

Il progetto operativo SRS (SpettroRadiometro Solare) ha lo scopo di sviluppare uno strumento in grado di misurare la radiazione solare e fornire uno spettro da cui ricavare lo spessore ottico spettrale dovuto agli aerosol (AOD), utilizzando componenti di ultima generazione.

Sulla base delle più recenti linee guida suggerite dall'Organizzazione Meteorologica Mondiale – WMO (report GAW n.191; guida CIMO), sono stati definiti requisiti e specifiche dei componenti del sistema SRS (si veda lo schema in Figura 6.1), che sono stati assemblati in un sistema originale (Figura 6.2) e successivamente sottoposto a procedura di calibrazione.

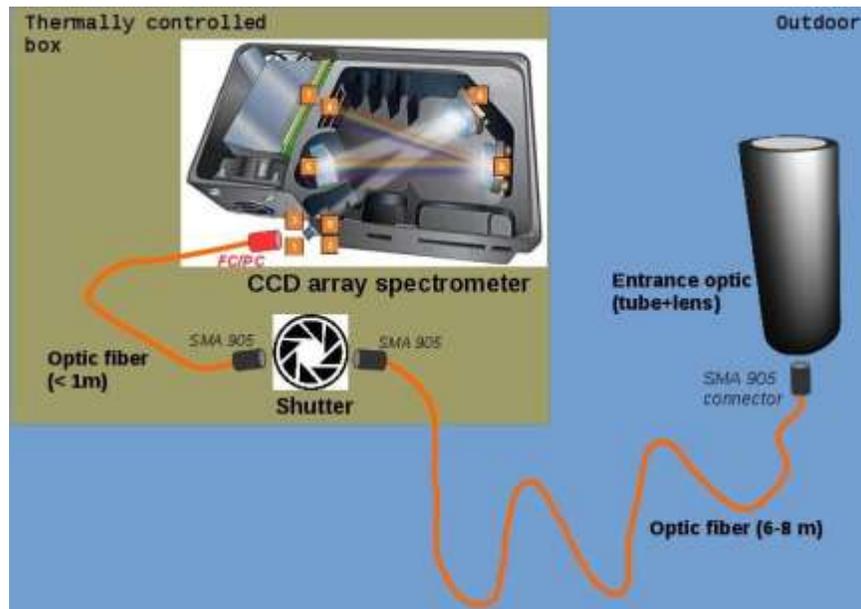


Figura 6.1: Rappresentazione schematica del sistema SRS e delle sue componenti, assemblate in modo custom.

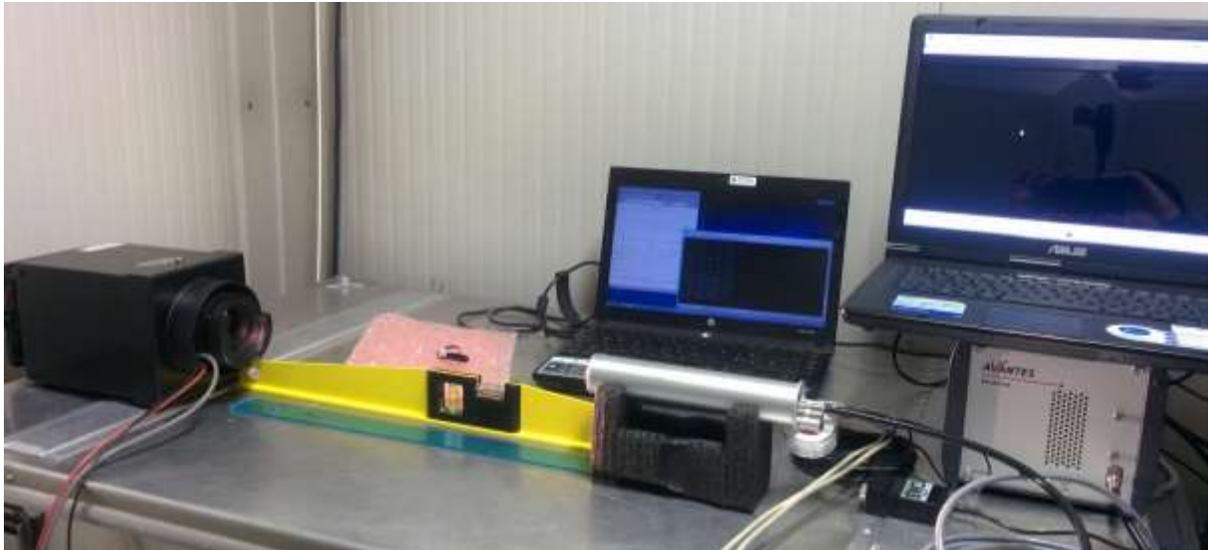


Figura 6.2: Una delle due unità SRS, assemblata ed impegnata in una sessione di test per la caratterizzazione della non-linearità.

Questi i requisiti che sono stati definiti per la componente spettroradiometro:

- Lo spettro solare verrà registrato da uno spettrometro ad array, ovvero un radiometro dotato di monocromatore che scinde la luce solare nelle sue componenti cromatiche. Il sensore dello spettrometro sarà basato sulla tecnologia dei CCD array, e sarà sensibile in un intervallo di lunghezze d'onda in cui operano gli strumenti (Prede POM, Cimel CE-318) delle principali reti mondiali di osservazione solare per il telerilevamento delle proprietà ottiche e fisiche degli aerosol (SKYNET/ESR, AERONET).
- Lo spettrometro durante le operazioni deve essere mantenuto in modo che le sue caratteristiche (es.: rapporto segnale/rumore – SNR, sensibilità, accuratezza in lunghezza d'onda) non dipendano dai fattori ambientali legati al sito di misura (temperatura, umidità). Questo considerando soprattutto che la maggiore causa di rumore è quello elettronico (dark noise), che è contraddistinto da una intensità direttamente proporzionale alla temperatura a cui opera il sensore (si veda ad es. Aramburu et al., 2015 oppure Davenport et al., 2015).
- Dallo spettro solare acquisito dallo spettrometro si dovrà essere in grado di identificare la presenza dei gas in traccia (O_3 , NO_2 , vapor acqueo) per stabilirne l'apporto sullo spessore ottico degli aerosol (AOD), attraverso una procedura di confronto con uno spettro solare extra-terrestre noto dalla letteratura.

Da questi primi punti ne sono conseguite le specifiche di seguito riportate:

- Intervallo spettrale almeno 300-1100 nm, per poter confrontare gli AOD con i canali degli strumenti delle reti AERONET o SKYNET/ESR;
- Risoluzione spettrale inferiore a 2 nm, preferibilmente attorno ad 1 nm, per l'identificazione dei gas in traccia;
- Lo spettrometro, ed il detector in particolare, devono essere dotati di termostatazione stabile (entro $\pm 0.1^\circ C$ dalla temperatura di lavoro) per mantenere basso e costante il SNR del sensore;
- Deve essere presente un otturatore (shutter) che permetta di misurare in maniera regolare la dark current effettiva su tutti i pixel attivi del detector.

Inoltre, dato che bisognerà integrare i dati provenienti da SRS nel sistema DAT si è definito un ulteriore requisito: l'esigenza di ottenere dal produttore dello spettrometro driver e librerie per sistemi operativi Linux, che permettano di interfacciarsi con lo strumento usando un programma di acquisizione ed elaborazione dei dati che verrà specificatamente sviluppato all'interno dell'UdR, date le particolari esigenze.

Un altro componente del sistema SRS (vedi nuovamente la Figura 6.1) è l'ottica di entrata, o collimatore, che ha la funzione di raccogliere la luce (solare in questo caso) in una guida ottica e portarla quindi all'ingresso dello spettrometro. I principali requisiti che il WMO raccomanda per gli strumenti che eseguono osservazioni di irradianza solare diretta sono i seguenti: resistenza agli agenti atmosferici (weatherproof); campo di vista (FOV) $< 2^\circ$ e slope angle $< 1^\circ$.

Questi requisiti si rispecchiano tradizionalmente in ottiche formate da un tubo (telescopio) alla cui apertura frontale viene applicata solitamente una finestra in quarzo (bassa attenuazione della radiazione solare entro le bande UV-Visibile-NIR) per proteggere l'interno e quindi anche la guida ottica, collegata all'altro estremo del tubo, da sporcizia e precipitazioni atmosferiche. All'interno

del tubo devono essere presenti dei diaframmi (baffles), per limitare il FOV e la luce parassita (stray light) che raggiunge l'ingresso della guida ottica. Analogamente allo spettrometro, si è scelto di acquistare da terze parti dei collimatori progettati ed assemblati da produttori esterni, in modo da consentire all'UdR di concentrare le risorse umane ed economiche disponibili su altre attività.

Per quel che concerne la guida ottica, i requisiti tecnici sono stati definiti anche in base alle esigenze logistiche di ARPA e OAVdA, dove saranno posizionate le due unità prototipo di SRS: la lunghezza della fibra ottica in particolare, è stata fissata in 6,5 metri, per permettere il posizionamento del collimatore sul tracker solare in esterna, mentre il resto dell'apparato (spettrometro, elettronica di controllo, ecc.) rimane all'interno di un edificio. Per questo motivo, anche la fibra ottica deve possedere un rivestimento weatherproof. Il diametro interno della fibra ottica determina l'intensità del fascio luminoso che entra nello spettrometro: secondo la valutazione tecnica di ARPA, una fibra di diametro 0,6 mm è adeguata a permettere la misura dello spettro solare durante tutta la durata dell'anno e in tutta la regione di spettro considerata (300-1100 nm).

Un altro aspetto che è stato valutato sono i connettori della fibra ottica: questi hanno come standard più comune lo SMA-905, ma a valle di una consultazione con membri della comunità scientifica si è deciso di richiedere un connettore di tipo FC/PC per il lato spettrometro, che permetta una ripetibilità accurata del posizionamento della fibra alla connessione con lo spettrometro.

L'attività di definizione dei requisiti e specifiche per il sistema SRS è iniziata a Novembre 2016 (M4), data in cui è iniziato anche un progetto di dottorato alla Sapienza Università di Roma che ha garantito la presenza presso ARPA di personale in formazione per l'UdR GAIA.

6.2. Modalità di scelta e risultati della ricerca di mercato

Stabiliti requisiti e specifiche per le componenti di SRS, ARPA ha intrapreso una ricerca di mercato contattando sia esperti della comunità scientifica che direttamente le ditte produttrici.

L'indagine ha messo in luce che nella comunità scientifica sono presenti in particolare tre produttori (Avantes, Ocean Optics, Stellarnet) per quel che riguarda gli spettrometri, e due produttori di collimatori già assemblati (Ocean Optics e Schreder CMS). Tutti questi produttori forniscono delle fibre ottiche, mentre quasi tutti forniscono anche gli shutter, sebbene con soluzioni tecniche differenti di caso in caso.

Attivata la procedura di acquisto pubblica, sono stati esaminati nel dettaglio i prodotti e le relative specifiche tecniche offerti dalle ditte; per quel che riguarda gli spettrometri, nella Tabella 6.1 sono riassunti gli elementi tecnici essenziali della strumentazione. Tutti i modelli presi in considerazione rispettano il requisito di intervallo spettrale (300-1100 nm), essendo equipaggiati con monocromatori e sensori CCD al silicio di prestazioni confrontabili; allo stesso modo, tutti possono essere equipaggiati con un ingresso FC/PC per la fibra ottica; la risoluzione spettrale e la presenza di termostatazione sono stati invece elementi sostanziali di confronto tra gli spettrometri, come descritto nel seguito.

- Avantes: sono stati valutati due modelli, l'ULS2048LTEC e l'ULS2048x64TEC, dotati entrambi di termostatazione elettrica (TEC) con celle di Peltier a 3 stadi, ma aventi una

risoluzione spettrale minima differente. Entrambi i modelli non sono dotati di shutter interno, per cui necessitano di un apparecchio esterno montato in linea sulla fibra ottica, di cui la stessa casa può esserne fornitrice.

- Ocean Optics propone principalmente due modelli: il QE PRO, dotato di TEC ma con una risoluzione spettrale minima >1 nm, ed il MAYA2000 PRO, non termostato ma dotato di una elevata risoluzione spettrale. Entrambi gli spettrometri possono essere equipaggiati con un otturatore interno (opzionale) oppure si può acquistare a parte lo shutter da posizionare sul percorso della guida ottica, analogamente alla soluzione Avantes.
- Stellarnet infine dispone di un modello, il Black Comet, dotato di TEC e con una risoluzione spettrale di 1,3 nm. Questo modello adotta per il monocromatore un sistema non convenzionale con grating e specchi curvi. Non dispone di shutter interno, e la casa non fornisce proprie soluzioni di otturatori esterni.

Marca, modello	Tipo di CCD	Range spettrale	Risoluzione spettrale	Termostat.	Costo (con IVA)
Avantes ULS2048LTEC	2048 pixel (array lineare)	300-1100 nm best efficiency: 300-960 nm	1.0 nm (slit width 10 µm)	TEC a 3 stadi (detector) + housing ventilato stabilità ±0.1°C	€7.200
Avantes ULS2048x64TEC	array 2048x64 pixel	300-1160 nm best efficiency: 300-960 nm	1.4 nm (slit width 10 µm)	TEC a 3 stadi (detector) + housing ventilato stabilità ±0.1°C	€7.200
Ocean Optics QE PRO	array 1024x58 pixel	285-1060 nm best efficiency: 200-950 nm	1.67 nm (slit width 10 µm)	TEC 1 stadio (detector) + housing ventilato stabilità >0.1°C	€15.000
Ocean Optics MAYA2000 PRO	array 2048x64 pixel	285-1100 nm best efficiency: 200-1050 nm	0.88 nm (slit width 10 µm)	NO, housing ventilato	€7.600
Stellarnet Black Comet BLK-CXR-SR	2048 pixel (array lineare)	300-1100 nm best efficiency: 300-960 nm	1.3 nm (slit width 14 µm)	TEC 1 stadio (detector) + housing ventilato stabilità >0.1°C	€5.900

Tabella 6.1 A: Schema delle principali specifiche valutate nella scelta del modello di spettrometro ad array.

Considerati tutti gli elementi appena descritti, l'UdR ha ritenuto che la scelta più appropriata secondo il criterio dell'offerta economicamente più vantaggiosa, fosse l'Avantes ULS2048LTEC. Inoltre, data anche la flessibilità d'uso conseguente, si è scelto di richiedere un sistema di ottica d'entrata e guida ottica che integri uno shutter esterno allo spettrometro.

Le ditte Ocean Optics e Schreder CMS hanno proposto ciascuno una soluzione di sistema integrato o da assemblare per collimatore e fibra ottica, dove è stato permesso ai produttori di usare la tradizionale connessione SMA-905 per le interconnessioni dei componenti (es.: collimatore-fibra, fibra-shutter), mentre da specifica richiesta si deve avere uno standard FC/PC per connettere l'apparato di ottica d'entrata allo spettrometro.

Entrambe le ditte hanno soddisfatto questo come gli altri requisiti riguardanti le guide ottiche, mentre le due proposte differiscono sia nel tipo di soluzione per il collimatore che per l'otturatore, come descritto nel seguito e riportato in Tabella 6.1 B.

- Schreder CMS propone come ottica d'entrata il telescopio J1004-SMA-SHUT, avente un corpo già assemblato completo di finestra protettiva in quarzo e di uno shutter integrato nello stesso telescopio; quest'ultimo è operabile sia manualmente che tramite segnale TTL. Il FOV dichiarato è di ~1,5°, pienamente entro le specifiche.
- La soluzione di Ocean Optics prevede invece un tubo collimatore assemblabile "Gershun Tube" con elementi che possono far variare il FOV fino ad 1°, ma il tubo non è dotato di finestra protettiva in quarzo (o di un elemento protettivo equivalente), che dovrebbe essere assemblata in seconda istanza da parte dell'UdR. I tubi Gershun non integrano l'otturatore, che viene fornito a parte ("In-line TTL Shutter"), e si assembla in linea sulla fibra essendo dotato in ingresso ed in uscita di connettori SMA-905. Lo shutter è operabile esattamente come il modello integrato dalla Schreder, in modalità sia manuale che con segnale TTL.

Marca, modello	Ottica	Otturatore	Fibra ottica	Costo (con IVA)
Schreder CMS J1004-SMA-SHUT	Tubo collimatore, 1,5° FOV, completamente weatherproof	Integrato nell'ottica	6,5 metri, core size 0,6 mm, weatherproof	€5.000
Ocean Optics Gershun Tube+TTL Shutter	Tubo collimatore, FOV variabile fino a 1,0°, parzialmente weatherproof	Assemblato sulla fibra ottica.	6,0 + 0,5 metri, core size 0,6 mm, weatherproof	€2.600

Tabella 6.1 B: Tabella riassuntiva con le principali caratteristiche tecniche valutate nella scelta del collimatore (ottica d'entrata)

A seguito di queste valutazioni, si è preferita la soluzione della ditta Schreder CMS, soprattutto per la garanzia di weatherproof su tutti i componenti, che ne assicura anche una più facile gestione e manutenzione nel quotidiano.

6.3. Report del collaudo presso sede ARPA VdA

Controllo di conformità della merce acquistata

A seguito dell'aggiudicazione dei due lotti della gara indetta da ARPA per la fornitura di due spettrometri e dei sistemi ottici d'entrata relativi, la strumentazione è stata consegnata in data 01/12/2017 presso la sede ARPA. Si è proceduto quindi al controllo della merce per verificare la conformità con quanto dichiarato dai preventivi delle due aziende fornitrici:

- 2x spettrometri Avantes ULS2048LTEC SensLine, con numeri di serie 1707016U1 e 1707017U1;
- 2x cavi di alimentazione (tipo PC, lung. ~1.5m) e cavi USB con connettori tipo A (lato PC) e tipo B (lato spettrometro)

- 2x set di fenditure (slit) di ricambio per spettrometro Avantes, con larghezza 25 e 50 micron;
- 2x manuali cartacei per AvaSpec-DLL, CD-ROM "AvaSpec-DLL" e CD-ROM "AvaSpec-DLL Interface Package";
- 2x ottiche d'entrata (collimatori) Schreder J1004-SMA-SHUT, comprendenti otturatori J1029-TTL-SHUTTER con numeri seriali 1019 e 1020;
- 2x fibra ottica Schreder con connettori SMA-905 (lato collimatore) e FC/PC (lato spettrometro)
- 7. 2x alimentatori 12V DC per otturatori J1029-TTL-SHUTTER

Questi articoli vengono dichiarati conformi a quanto stabilito all'atto dell'acquisto da parte di ARPA.

Controllo di conformità: dettaglio sugli spettrometri

Secondo la documentazione allegata, in entrambi gli spettrometri sono stati assemblati dei reticoli a diffrazione (diffraction grating) di tipo VA, con densità di fenditure 300 linee/mm e larghezza di banda nominale dai 300 ai 1100 nm. Inoltre sono stati installati i seguenti optional:

- Lente focalizzante in quarzo per il detector DLC-UV/VIS 200, per incrementare la sensibilità nell'intervallo di lunghezze d'onda 200-1100 nm
- Fenditura d'entrata Slit-10-RS, di larghezza 10 μm e intercambiabile (opzione -RS)
- Order-sorting coating OSC-UA con filtri long-pass a 350 e 600 nm, per la riduzione degli effetti di rifrazione al secondo ordine, specie nel visibile
- Connettore per la fibra di tipo FC/PC

Tutte le precedenti caratteristiche rispondono correttamente alle specifiche richieste.

Inoltre, a corredo della strumentazione sono stati allegati da Optoprim i report riguardanti:

- Calibrazione delle lunghezze d'onda: per ognuno dei due spettrometri, è stata misurata la differenza ($\Delta\lambda$) tra lunghezza d'onda effettiva sul detector e teorica relativa a diverse (>25) righe spettrali standard, e questa risulta essere contenuta entro ± 0.10 nm. Tramite regressione lineare, i tecnici Avantes hanno anche ricavato i coefficienti di una relazione polinomiale di quarto grado tra lunghezze d'onda standard e numeri di pixel associati, i quali poi sono stati registrati sulla EEPROM degli strumenti.
- Correzione per la non linearità: su entrambe le unità Avantes è stata misurata la correzione da applicare per preservare la linearità della risposta del detector anche per valori di conteggio per pixel vicini a saturazione. Usando tempi di integrazione tra 1,10 e 500 millisecondi, è stata poi ricavata una relazione polinomiale di settimo grado tra i conteggi (ascissa) e i conteggi normalizzati (per secondo). Entrambi gli strumenti, dopo aver ricevuto la rispettiva correzione, dichiarano una linearità attorno a 99.7%.

In fase di caratterizzazione degli spettrometri saranno anche effettuate misure per controllare che le due precedenti calibrazioni effettuate dal produttore siano ancora valide, dato che il trasporto

degli strumenti ed il cambiamento dei fattori climatici può influire sulle caratteristiche dei sensori e dell'apparato ottico interno agli spettrometri.

Ispezione preliminare della strumentazione

Gli spettrometri sono dotati frontalmente di connettore FC/PC per fibra ottica, come da richiesta; sono presenti anche i due indicatori a LED, uno che indica lo stato (on/off) e l'altro l'attività (acceso durante le acquisizioni). Sul lato posteriore degli spettrometri si hanno i connettori per il cavo di alimentazione, una porta USB tipo B ed una porta seriale (tipo SUB-D) per la connessione con un PC ed un connettore tipo SMB (50R) coassiale per l'eventuale sincronizzazione con altri spettrometri Avantes-USB2. Sul lato posteriore inoltre sono presenti il tasto di accensione e le griglie di uscita per le due ventole che provvedono alla termostatazione del detector e dell'intero apparato (Figura 6.3).



Figura 6.3: (a) Spettrometro Avantes ULS2048LTEC (fronte) con telescopio Schreder J1004.
(b) Lato posteriore dello spettrometro

Le ottiche d'entrata presentano un aspetto esteriore integro, sostanzialmente identico a quello che presentavano al momento della prima consegna in ARPA dalla ditta Schreder CMS (14/09/2017); il dissecante (silica gel) appare anch'esso integro, di colore bianco (assorbendo umidità si colorerebbe di rosa) e con indicatore di consumo al 40%.

Gli otturatori integrati nelle ottiche sono dotati di connettore seriale RS-232 per l'azionamento automatico tramite segnale TTL; il box dove è presente il connettore è provvisto di ingresso per l'alimentazione DC a 12V (fornita) e interruttore per selezionare una delle modalità di operazione (aperto - operato via TTL - chiuso).

L'ispezione visiva delle fibre ottiche non ha evidenziato alcun difetto apparente.

Collaudi iniziali

Il primo collaudo è consistito nella semplice prova di accensione dei due spettrometri: entrambi sono stati accesi per diversi minuti (senza collegarli ad un PC), durante i quali è stato verificato che entrambe le ventole fossero operative; questo primo test non ha evidenziato alcun problema apparente nel funzionamento degli spettrometri.

La seconda parte del collaudo ha riguardato una piccola serie di misure test: ogni spettrometro, a turno, è stato collegato ad un PC sul quale è presente il software AvaSoft 8.7, tramite il cavo USB fornito. Sono state prese inizialmente alcune misure di spettri in condizioni di penombra all'interno degli uffici ARPA, ed è stata verificata qualitativamente la buona sensibilità dello strumento, anche con intensità luminose molto basse.

Per quanto riguarda la termostatazione, si è notato che per raggiungere stabilmente la temperatura di lavoro (attualmente impostata a 5°C) occorrono almeno 3-5 minuti.

Per quel che concerne le ottiche d'entrata, sono stati effettuati inizialmente dei semplici test di azionamento manuale degli otturatori (collegando solo l'alimentazione elettrica), che hanno rivelato il buon funzionamento dell'apparato elettrico.

Successivamente, come verrà descritto anche nel report riguardante la fase di calibrazione e caratterizzazione degli spettrometri, è stato verificato il corretto funzionamento degli shutter anche tramite comando TTL.

In chiusura alla prima fase di test sono stati eseguiti i collaudi del sistema completo, ottica d'entrata+fibra+spettrometro, verificando l'effettivo potere oscurante degli otturatori ed effettuando una misura con una sorgente luminosa di prova: è stato usato il software AvaSoft in dotazione per misurare lo spettro di una sorgente LED a luce bianca (flash/torcia di due smartphone), appena dopo aver eseguito una misura ad otturatore chiuso (Figura 6.4), in modo da avere i dark counts di riferimento da sottrarre alla misura effettuata con lo stesso tempo di esposizione.

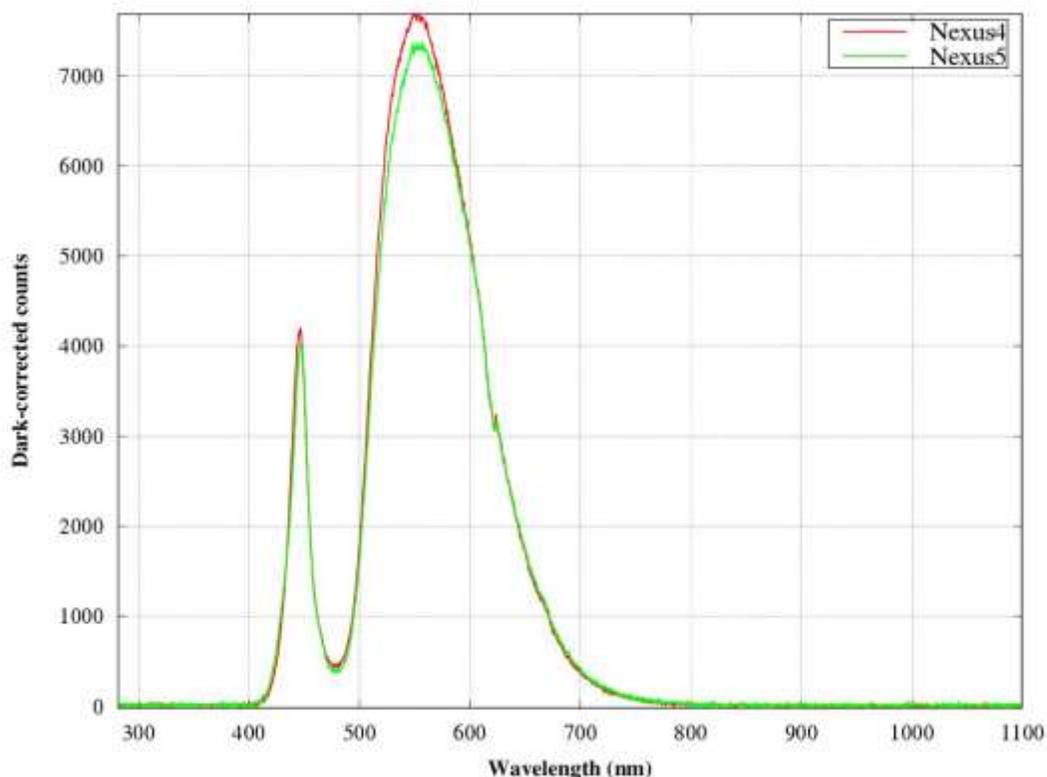


Figura 6.4: Spettri delle lampade LED di due smartphone, presi usando l'unità Avantes 1707016U1 e l'ottica 1019. Il tempo di integrazione è di 40 ms e i conteggi su ogni pixel sono stati corretti con i dark counts.

6.4. Report della caratterizzazione delle due unità SRS presso la sede di ARPA VdA

Obiettivi delle caratterizzazioni

La fase di caratterizzazioni degli spettrometri permette innanzitutto di controllare il buon funzionamento di tutte le componenti del sistema spettrofotometrico, che devono rientrare entro le specifiche di qualità definite e di effettuare le prime caratterizzazioni su entrambe le unità di SRS, in modo tale da permettere la misura dello spessore ottico spettrale con elevata precisione.

Misura della corrente di buio

Secondo quanto definito nel protocollo di misura per SRS, su entrambi gli spettrometri (1707016U1, 1707017U1) è stato misurato il segnale di buio (dark current) in maniera regolare appena prima di ogni acquisizione durante tutti i test effettuati nei laboratori ARPA. In questa

maniera si ha a disposizione un dataset di dark counts per tempi di integrazione che vanno dal minimo strumentale (1,05 ms) fino a 180 s.

La procedura seguita per ogni spettrometro durante ogni sessione di test:

- Viene collegata l'ottica d'entrata (collimatore) Schreder allo spettrometro, tramite fibra ottica; lo spettrometro viene collegato al PC che comanda l'acquisizione tramite cavo USB;
- Si attendono almeno 5 minuti dal momento dell'accensione dello spettrometro all'inizio delle misure: questo tempo è stato valutato empiricamente in base al tempo necessario al sistema di termostatazione (cella Peltier a 3 stadi) per stabilizzarsi sulla temperatura di lavoro predefinita (5.0°C)
- Prima di ogni misura da eseguire (con otturatore aperto), si acquisisce il segnale di buio tenendo l'otturatore (shutter) chiuso, impostando lo stesso tempo di esposizione che verrà utilizzato durante la misura.



Figura 6.5: Spettrometro collegato tramite cavo seriale al comando elettronico dello shutter.

Come già detto in precedenza, uno dei test iniziali effettuati presso ARPA riguarda la verifica di funzionamento degli shutter. Questi permettono di misurare il segnale di buio, quando l'otturatore viene chiuso, prima di ogni misura spettrometrica. La dark current associata ad ogni misura è il segnale di background che deve essere sottratto al segnale misurato (ad otturatore aperto). Le operazioni di test di apertura/chiusura dello shutter sono state effettuate inizialmente usando il comando manuale.

Per operare in maniera automatica, si agisce sullo switch dello shutter posizionandolo sulla modalità "TTL". Grazie all'uso dei driver e librerie AvaSpec per OS Linux è stato sviluppato un programma che può operare l'apertura e chiusura dello shutter direttamente dallo spettrometro, coordinando queste operazioni con la misura. La porta seriale di cui è dotato lo spettrometro è infatti in grado di produrre un segnale TTL (segnale a gradino di ampiezza 5 V), agendo adeguatamente sull'output analogico.

La Figura 6.5 mostra la scheda di controllo dello shutter (al centro della foto) collegata tramite un cavo seriale, ai pin 8 (GND) e 17 (Analog output, 0-5 V DC) del connettore Sub-D a 26 poli presente sul lato posteriore dello spettrometro Avantes ULS2048LTEC.

Caratterizzazione della non-linearità del sensore



Figura 6.6: A sinistra, panoramica della configurazione strumentale adottata per i test di non-linearità. A destra, dettaglio della configurazione, durante un controllo per il corretto allineamento tra fascio della lampada e ottica d'ingresso del sistema spettrometrico

La modalità di caratterizzazione del grado di linearità dei due spettrometri è analoga a quella utilizzata dalla casa produttrice: si misura per tempi di integrazione crescenti lo spettro di una sorgente luminosa stabile, fino al raggiungimento di una soglia prossima alla saturazione del sensore CCD, e si valuta dall'analisi dei dati di conteggi per pixel quanto è lo scostamento rispetto alla proporzionalità lineare.

Materiali e metodo sperimentale

La sorgente luminosa usata per le caratterizzazioni della non-linearità è una lampada alogena al quarzo-tungsteno (QTH) con potenza emessa nominale di 200 W ed output controllato da un sistema ad alta precisione che mantiene la corrente entro i $(6,300 \pm 0,002)$ A. La lampada QTH è alloggiata dentro un porta-lampada (Figura 6.6(a), sinistra) dotato di ventilazione.

La configurazione usata durante questi test (si vedano figure 6.6(a) e (b)) è la seguente: l'ottica d'ingresso (collimatore) dello spettrometro è disposta ad una distanza di 25 cm dall'uscita del porta-lampada, con un allineamento riproducibile entro margini di pochi mm, grazie all'uso di un supporto per il telescopio e di un distanziatore fabbricati per lo scopo.

Alcune misure di test sono state effettuate inizialmente con l'unità SRS (I), costituita dall'accoppiamento dello spettrometro con seriale 1707016U1 con l'ottica avente seriale 1019, operando lo shutter in modalità manuale e registrando gli spettri con il software proprietario AvaSoft. L'uso successivo del programma di acquisizione automatica ha permesso di effettuare più rapidamente le misure con entrambe le unità SRS.

Grazie all'esperienza maturata nella prima sessione di test, si sono potuti valutare i tempi di integrazione τ e una soglia massima di conteggi entro i quali spaziare durante le misure: si è partiti da $\tau_{\min}=5$ ms, procedendo a passi di 5 ms, fino a registrare su almeno un pixel della CCD un valore di 65000 conteggi, vicino al valore di saturazione (circa 69000).

Per mantenere approssimativamente costante il rapporto segnale rumore (SNR) su tutto l'intervallo di tempi di integrazione considerato, si è mantenuto costante il prodotto $\tau^* \text{avg}=2,0$ s,

dove avg è il numero di medie (averaging) effettuato per calcolare lo spettro in output, che assume quindi un valore massimo di $n_m = 400$ per $\tau_{min} = 5$ ms.

Metodo per l'elaborazione dei dati sperimentali

Ai fini di una effettiva comparazione tra le quantità ricavate dalle misure nel laboratorio ARPA e quelle riportate sul report tecnico del produttore, si è seguita la seguente procedura:

1. I conteggi N vengono convertiti da una rappresentazione a 16 bit a 14 bit, ossia dividendo per 4 i conteggi effettivi (corretti per il dark);
2. Si sceglie un dataset di conteggi, presi a tutti i tempi di integrazione, provenienti da 10 diverse lunghezze d'onda equispaziate tra loro; vengono esclusi i valori al di sotto dei 500 conteggi per pixel, una soglia stabilita empiricamente in base al crescente effetto relativo del rumore termico, al diminuire dei conteggi;
3. Si divide per il tempo di integrazione ogni valore di conteggi N, in modo da avere un valore di conteggi/secondo S(N);
4. Si normalizzano i valori di S(N) al massimo raggiunto alle rispettive lunghezze d'onda;
5. Considerando come variabile indipendente i conteggi N e come dipendente gli S(N) normalizzati, si è scelto di fittare i dati con una curva polinomiale di settimo grado, analoga a quella usata dal produttore, che parametrizza la deviazione degli S(N) dal comportamento lineare (in cui $S(N) \sim N$);

Infine, si può valutare il grado di linearità delle misure S(N) come la percentuale data dalla deviazione standard dei residui: $L(S) = 1 - \langle \sigma(S) \rangle$.

Risultati: unità SRS (I)

Per quanto riguarda la prima unità di SRS (spettrometro 1707016U1), il tempo di integrazione massimo registrato è stato $\tau_{max} = 235$ ms, e si sono registrati quindi 47 spettri a tempi di integrazione crescenti. A partire da un dataset di 457 punti, escludendo come detto i punti con $N < 500$, e correggendo i conteggi usando i coefficienti della correzione polinomiale forniti dal produttore, si passa da una linearità iniziale (misure grezze) del 98,266% al 99,756%.

Dal fit polinomiale ricavato sullo stesso dataset di S(N) (Figura 6.7, pannello superiore), si sono ottenuti i coefficienti sperimentali per la correzione della non-linearità, ottenendo un grado di linearità che è del 0,014% superiore. Si ha invece una differenza massima tra le due correzioni dello 0,74%, implicabile in gran parte al rumore sperimentale della misura, che causa una deviazione standard sui residui analoga (dati non mostrati).

Si può quindi ritenere valida la correzione fornita dal produttore, entro l'errore sperimentale.

Se si ragiona in termini di errore sulla stima dell'irradianza misurata che si può commettere a causa dei diversi fattori di incertezza sulla misura, si può concludere che la non linearità residua è un fattore ininfluente, mentre il rumore di tipo termico rappresenta comunque la fonte primaria di incertezza, nonostante la termostatazione del sensore CCD.

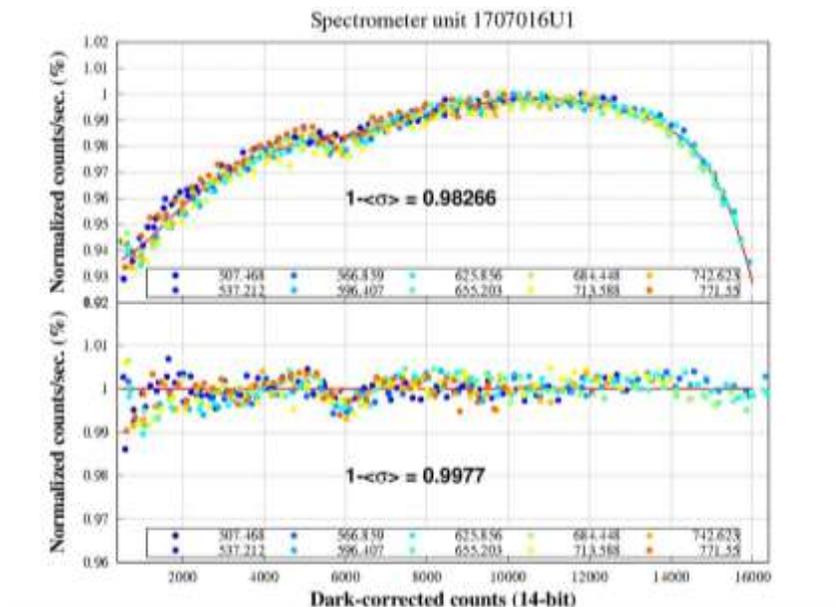


Figura 6.7: Conteggi normalizzati in funzione dei conteggi, scalati a 14 bit, per l'unità (I) di SRS. Pannello superiore: valori non corretti per effetto della non-linearità, sovrapposti alla curva polinomiale ricavata a partire dai dati sperimentali. Pannello inferiore: valori corretti con la funzione polinomiale ottenuta dai dati sperimentali.

Risultati: unità SRS (II)

I risultati che riguardano la seconda unità di SRS (spettrometro 1707017U1), sono analoghi a quelli della prima unità. In questo caso il tempo di integrazione massimo registrato è stato $\tau_{max}=220$ ms, misurando 44 spettri. Con gli stessi criteri usati nel caso precedente, si ha un dataset di 428 misure di $S(N)$, che inizialmente hanno una linearità del 98,408%, correggendo i quali con la funzione fornita da Avantès si passa al 99,746%, mentre con il polinomio ottenuto dai dati sperimentali la linearità aumenta di circa lo 0,003% mediamente (Figura 6.8). Per questo spettrometro lo scostamento massimo tra le due correzioni è più basso, circa 0,17%. Anche in questo caso si può quindi ritenere valida la correzione fornita dal produttore.

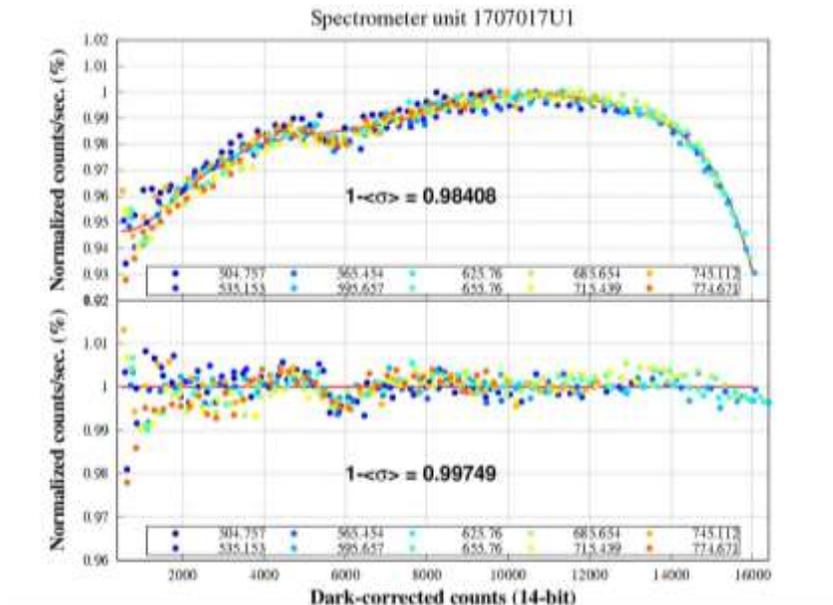


Figura 6.8: Conteggi normalizzati in funzione dei conteggi, scalati a 14 bit, per l'unità (II) di SRS. Pannello superiore: valori non corretti per effetto della non-linearità, sovrapposti alla curva polinomiale ricavata a partire dai dati sperimentali. Pannello inferiore: valori corretti con la funzione polinomiale ottenuta dai dati sperimentali.

Misura dell'allineamento spettrale

La misura dell'allineamento spettrale su uno spettrometro ad array, come messo in evidenza anche dal report WMO/GAW 191 e dalla letteratura scientifica a riguardo, assieme alla determinazione della slit function permette di poter correlare lo spettro solare misurato con degli spettri di riferimento. Come già altri argomenti esposti, risulta di particolare rilevanza per gli obiettivi dell'UdR GAIA.

Questo significa da una parte avere un ulteriore termine di paragone quando si valuta la sensibilità spettrale dello strumento, dall'altra soprattutto implica la capacità di stimare il contributo di alcuni gas atmosferici (O_3 , NO_2 , vapor acqueo) all'attenuazione della radiazione solare in alcune particolari bande di assorbimento caratteristiche.

Il fine di questa misura quindi è di convertire la posizione relativa di un singolo pixel sulla matrice CCD dello spettrometro in una precisa lunghezza d'onda, determinando così la cosiddetta funzione di dispersione λ_p .

Come la correzione per la non-linearità, l'allineamento spettrale fa parte delle calibrazioni standard fornite dal produttore, per cui lo scopo delle attuali misure è soprattutto quello di controllare che la calibrazione originale sia ancora valida, entro i limiti di precisione definiti dalla distanza in lunghezza d'onda tra pixel adiacenti.

Materiali e metodo sperimentale

La determinazione della funzione di dispersione spettrale richiede la misura dello spettro di una o più sorgenti caratterizzate da righe di emissione la cui lunghezza d'onda sia ben nota.

Presso ARPA è disponibile una lampada a scarica di gas mercurio (Hg), il cui spettro di emissione nell'intervallo di interesse (300-1100 nm) è caratterizzato da diverse righe di intensità relativa elevata (>3000, Kramida et al. 2018), ma la cui intensità effettivamente misurata dipende in gran parte anche dalla sensibilità della CCD, che secondo le specifiche fornite dal produttore (Sony) varia in maniera irregolare per tutto l'intervallo di lunghezze d'onda 300-1100 nm, con un massimo attorno ai 600 nm.

La lampada è alloggiata in un porta-lampada dotato di una finestra laterale da cui il flusso luminoso può uscire in maniera direzionale.

Data la relativa bassa potenza (75 W) della lampada, per misurare dei picchi con sufficiente intensità è stato necessario accostare l'ottica d'entrata di SRS alla finestra del porta-lampada. Inoltre, per evitare "rumore" dovuto alla luce diffusa presente nel laboratorio, il porta-lampada e l'ottica dello spettrometro sono state alloggiare all'interno di una scatola, in modo da avere come unica sorgente la lampada Hg.

Le misure sono state effettuate attualmente operando lo shutter in modalità manuale e registrando gli spettri con il software proprietario AvaSoft.

Metodo per l'elaborazione dei dati sperimentali

Per discriminare al meglio i picchi dovuti alle righe di emissione della lampada Hg dal rumore si è considerato lo spettro ottenuto dalla sommatoria di tutti gli spettri acquisiti, aumentando in tal modo in maniera artificiosa il rapporto segnale/rumore (SNR), una grandezza chiaramente fondamentale in questo campo, ben oltre i limiti strumentali.

D'altronde lo scopo di questa operazione è la sola individuazione della posizione dei picchi come massimi locali sul dato, non la loro forma o intensità relativa. Dallo spettro totale ottenuto si sono individuate le ascisse P_k associate ai picchi principali, espresse in termini di numero relativo di pixel sull'array (pixel number, 0-2047).

Per ottenere una accuratezza *sub-pixel* nel posizionamento si è ricorsi a due metodi tra loro differenti:

- Metodo del centroide o del baricentro: individuata la posizione M_k del massimo locale, si calcola la posizione centrale come media pesata nell'intorno di ± 4 pixel
- Interpolazione gaussiana, nello stesso intorno di 4 pixel adiacenti al picco

A partire dalle posizioni P_k ottenute con entrambi i metodi si sono ricavate due differenti polinomi di terzo grado che descrivono la relazione tra i pixel number P e la lunghezza d'onda associata λ_p , ovvero la relazione di dispersione caratteristica dello spettrometro.

Risultati: unità SRS (I)

In questa prima sessione di test, si sono potuti valutare i tempi di integrazione τ e una soglia massima di conteggi entro i quali spaziare durante le misure: si è partiti da $\tau_{\min}=100$ ms, incrementando (in maniera graduale ma non equispaziata) i tempi di esposizione fino a 60 s, per un totale di 19 spettri misurati. Il numero di medie (averaging) usato è $\text{avg}=5$ per tutte le misure. Applicando i due metodi di individuazione delle posizioni P_k si sono trovate 5 corrispondenze con linee caratteristiche della lampada Hg. Come emerge dalla tabella sottostante, i due metodi non portano a differenze significative nei valori dei coefficienti del polinomio, che si discostano da quelli trovati dal produttore solo in misura marginale:

	C3	C2	C1	C0
Avantes	-1,83368E-09	-1,62526E-05	5,97371E-01	281,74645
Metodo: baricentro	-8,01202E-08	3,89815E-05	5,88382E-01	281,55318
Metodo: gaussiane	-4,62798E-08	1,35743E-05	5,93405E-01	281,35003

Andando nel dettaglio, le tabelle sottostanti riportano, in corrispondenza di ogni riga spettrale del mercurio, le posizioni P_k (ricavate con il metodo del baricentro o con quello delle gaussiane), ed i valori λ_p ottenuti dalle relazioni di dispersione ricavate sperimentalmente, a confronto con quelli forniti dalla funzione memorizzata nella EEPROM dello strumento da Avantes.

Come è evidente, le differenze stimate tra la lunghezza d'onda ricavata con la funzione di dispersione del produttore e quella reale sono maggiori rispetto alle stesse quantità ricavate dai dati sperimentali, ma si mantengono comunque entro 0,6 nm, ovvero la distanza intra-pixel che si ottiene sull'array. Questo permette di mantenere l'uso dei coefficienti originali per effettuare l'allineamento spettrale dei dati sperimentali con degli spettri solari di riferimento.

True Wvl. (nm)	Pixel # (centroid)	Fred. Wvl. (New)	Fred. Wvl. (Orig.)	Difference (True-New)	Difference (True-Orig)	Difference (Orig-New)
312,6674	52,5501	312,6688	312,0883	-0,0014	-0,5268	0,5246
365,0168	140,8043	365,0088	365,5808	0,0072	-0,5740	0,5812
404,8585	207,8085	404,8884	405,0477	-0,0119	-0,2012	0,2194
435,8335	260,1140	435,8271	435,9992	0,0064	-0,1657	0,1721
545,0750	448,5340	545,0753	545,2525	-0,0003	-0,1775	0,1772

True Wvl. (nm)	Pixel # (centroid)	Fred. Wvl. (New)	Fred. Wvl. (Orig.)	Difference (True-New)	Difference (True-Orig)	Difference (Orig-New)
312,6674	52,5503	312,6682	312,0882	0,0012	-0,5278	0,5295
365,0168	140,7673	365,0219	365,6096	-0,0051	-0,4938	0,4877
404,8585	207,8088	404,8484	404,9787	0,0101	-0,2222	0,3323
435,8335	260,1581	435,8889	435,0919	-0,0054	-0,1975	0,1921
545,0750	448,5472	545,0748	545,2603	0,0002	-0,1853	0,1855

Risultati: unità SRS (II)

La medesima procedura si attua per la misura di allineamento spettrale con la seconda unità SRS.

6.5 Realizzazione dell'inseguitore automatizzato (tracker)

Il tracker ha lo scopo di avere un sistema di puntamento adatto alle esigenze della misura, capace di puntare in totale autonomia il Sole in qualsiasi momento del giorno e di inseguirlo con una precisione di puntamento adeguata alle misure di ARBOL e di SRS. L'apparato è composto da diverse parti meccaniche o elettroniche, alcune di origine commerciale altre progettate e costruite ad hoc nell'ambito del progetto. Tra gli elementi reperiti in commercio troviamo:

- La montatura, con motori compatibili (2 versioni differenti)
- Il computer di controllo, un RaspBerry Pi 3
- Il convertitore analogico-digitale (ADC) a 16 bit per RPi
- Il ricevitore GNSS

Tra gli elementi custom troviamo invece:

- Le schede di alimentazione motori (realizzati nella prima versione di tracker)
- La scheda di amplificazione per l'ADC
- Il puntatore con il fotodiode a quadrante (QPD)
- Lo schema di puntamento è basato su due movimenti, quello di Declinazione (DEC) e quello di ascensione retta (RA), che con un opportuno algoritmo sono utilizzati per effettuare tutte le operazioni di puntamento automatico e di inseguimento automatico.

L'architettura del sistema di tracking

L'architettura del sistema è rappresentata schematicamente in Figura 6.8.

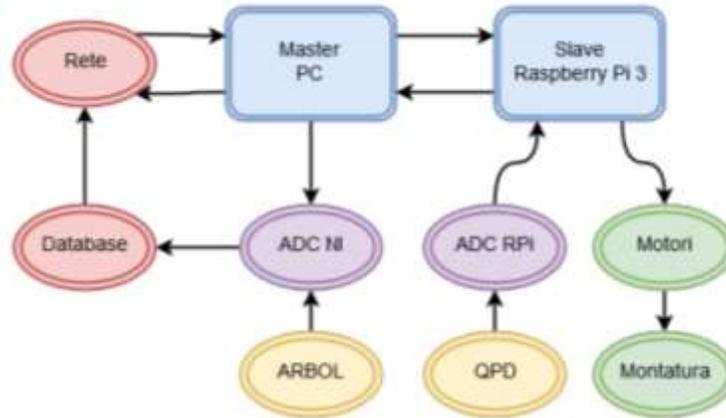


Figura 6.8: Schema della struttura master-slave descritta nel testo.

Il sistema è composto da un computer principale (master) che ha la funzione di gestire le componenti del sistema in maniera sincrona. Esso fornisce i comandi di movimento al Raspberry Pi 3 (slave) che tramite un codice Python controlla il movimento degli assi AR e DEC in autonomia. Inoltre svolge il compito di coordinare l'acquisizione dati dello strumento ARBOL. Quest'ultimo è collegato ad un convertitore analogico digitale (ADC) a 16 bit e 16 canali d'ingresso, prodotto dalla National Instruments (NI). Il vantaggio di avere una unità slave dedicata al puntamento è rappresentato dal fatto di rimanere del tutto indipendente dal resto del sistema, sia per quanto riguarda il controllo degli assi di movimento, sia per l'acquisizione attraverso l'ADC dei segnali del fotodiode.

Il sistema di acquisizione è programmato in maniera tale da poter accedere in remoto al master, che comunica allo slave di muovere il tracker e acquisire dati con SRS e contemporaneamente coordina la presa dati da parte del bolometro ARBOL.

La montatura motorizzata

La montatura è di tipo equatoriale EQ3 della ditta SkyWatcher. Una modifica del sistema meccanico ha permesso di trasformare la montatura in configurazione azimutale, mantenendo la flessibilità fornita dal prodotto commerciale. Evidentemente tutto il sistema di puntamento/inseguimento è stato successivamente riadattato per far funzionare la meccanica in maniera del tutto custom rispetto alla sua originale destinazione d'uso.

I due motori AR e DEC sono di tipo passo-passo bipolari con alimentazione 6V, 48 step/giro, con risoluzione di 7.5 gradi/step. Considerando i rapporti di riduzione vite-motore e motore-montatura si ottengono risoluzioni di 1.45 arcsec per l'asse AR e 4.96 arcsec per l'asse di declinazione. Il controllo utilizzato è a passo intero moltiplicato per un fattore 4 (non è necessario implementare un controllo a frazioni di passo). Quindi la risoluzione reale si quadruplica a 5.8 arcsec/step per RA e 19.85 arcsec/step per DEC.

Questa risoluzione è ampiamente sufficiente per i nostri scopi: infatti il Sole ha un diametro angolare di 30 primi d'arco, corrispondenti a 90 step in DEC e 310 step in AR.

Cruciale diventa controllare il recupero del gioco che si presenta ad ogni inversione del moto. Questo errore sistematico è stato accuratamente quantificato in 19 step e compensato via software, sia per quanto riguarda i movimenti sia per quanto riguarda il calcolo delle coordinate. Durante lo sviluppo si è inoltre passati a realizzare il controllo motori tramite interfaccia software con il controllore Synscan fornito con la montatura SkyWatcher EQ3 Pro. Questa soluzione ci ha permesso di adottare le librerie del pacchetto software INDI Library (<http://www.indilib.org/download/raspberry-pi.html>). Instrument Neutral Distributed Interface (INDI) è un protocollo che permette il controllo, l'acquisizione di dati e lo scambio dati tra strumenti in particolare in ambito astronomico (ma anche meteorologico). L'architettura delle librerie permette di eseguire sulla Raspberry un software che agisce da server ed è connesso alla pulsantiera Synscan con interfaccia seriale. Il server ha gli opportuni driver per controllare la montatura ed in ogni momento ne conosce la posizione. Al fine di impartire comandi alla montatura, il software sviluppato per inseguire il sole mediante l'utilizzo del fotodiode a quadrante, si conatterà al server e impartirà i comandi necessari per posizionarsi sul sole ed inseguirlo. Tale soluzione permette anche di sviluppare software concorrenti che connettendosi al server ottengono il controllo della montatura o semplicemente vanno a leggere il puntamento. Nel nostro caso è stato necessario installare anche il wrapper Python per indi (<http://indilib.org/develop/indi-python-bindings.html#h1-2-install-pyindi-client>)

In figura seguente è possibile vedere lo schema di collegamento.

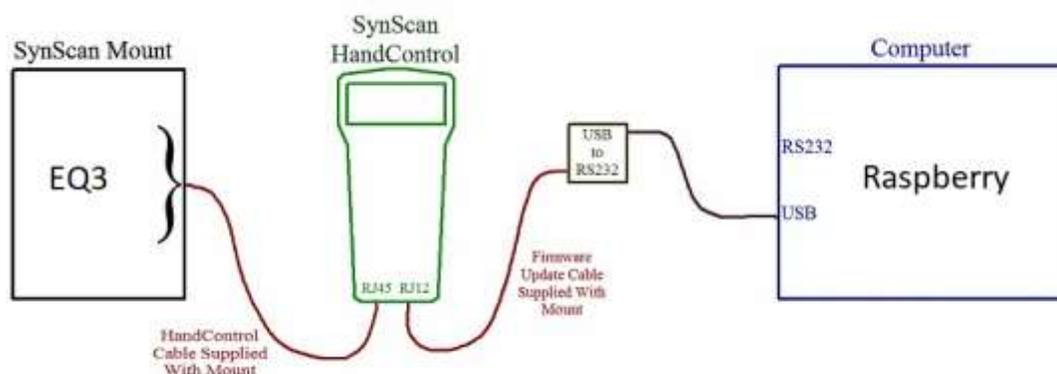


Figura 6.9 Schema di collegamento della pulsantiera Skywatcher Synscan

Raspberry Pi

Raspberry Pi (RPi) è un single board computer a basso costo progettato e costruito dalla Raspberry Pi Foundation (UK). Il sistema operativo ufficiale, di architettura GNU/Linux è RASPBIAN, una distribuzione basata su Debian nella quale sono preinstallati una serie di strumenti per la programmazione, tra le quali la shell per l'esecuzione diretta di Python2 e Python3.

Raspberry Pi 3 possiede un processore 1.2 GHz 64-bit quad-core modello ARM Cortex-A53 e 1 Gb di RAM. Sia la memoria RAM che la memoria ROM sono gestite da una micro-USB da 16 Gb, sulla quale è installato anche il sistema operativo. Inoltre sono presenti 4 porte USB, una porta HDMI e la presa ethernet. La scheda ha la possibilità inoltre di connettersi via wireless tramite

Wi-Fi e Bluetooth. Poiché RPi non dispone di un clock interno, è necessario collegarlo ad un sistema esterno per sincronizzare la data e l'orario e per fornire il clock che RPi non possiede. Abbiamo utilizzato a tal proposito un modulo GNSS commerciale integrato (vedi sopra), per il calcolo delle effemeridi.

La porta GPIO può erogare complessivamente una corrente di 50 mA, mentre ogni pin di output può supportare fino a 16 mA. La resistenza serie dei circuiti di input/output della porta è pari a 10 M. La scheda RPi viene comandata sia tramite protocollo secure shell SSH che tramite desktop remoto VNC. Il collegamento tramite altro PC può avvenire tramite la rete oppure tramite un cavo ethernet non incrociato.

Comunicazione GPIO e I2C

Una caratteristica interessante di Raspberry Pi è la presenza di 40 pin programmabili posti a lato della scheda. Sono presenti pin di alimentazione a 3,3 V e 5V, pin di massa, comunicazione I2C e altri ingressi visualizzabili in figura. I pin che non hanno una denominazione specifica sono di tipo I/O e possono leggere o dare in uscita segnali a 3,3 V.

Ciascun motore necessita di 4 pin. Seguendo la denominazione BOARD, al motore DEC sono stati associati i pin 32, 36, 38 e 40, mentre al motore RA sono stati associati i pin 31, 33, 35 e 37.

Il convertitore analogico-digitale

Raspberry non possiede ingressi analogici. Per leggere quindi i segnali provenienti dal fotodiode a quadrante serve un convertitore analogico-digitale di segnale (ADC). Quest'ultimo comunica con RPi tramite una porta con interfaccia I2C (un'interfaccia seriale composta da due linee: SCL, Serial Clock, per dare la frequenza di clock, e SDA, Serial Data, per la trasmissione dati). I collegamenti con RPi avvengono tramite il pin 3 e il pin 5.

Il convertitore usato è il modello ADS1115, costruito dalla società Texas Instruments. Possiede caratteristiche ideali per il nostro scopo. Ha 4 ingressi analogici, una frequenza di acquisizione di 820 samples/s, risoluzione a 16bit, bassa potenza dissipativa, è capace di leggere segnali in ingresso fino a +- 6 V. Inoltre è compatibile per la comunicazione tramite la porta I2C presente su Rpi. La versione commercializzata dalla ditta Adafruit è molto economica ed è general purpose, mentre nello sviluppo della versione definitiva di tracker siamo passati alla versione con pin compatibili raspberry al fine di poterla integrare facilmente nel progetto ed includerla nel case di quest'ultima.

Ricevitore GNSS

Per risolvere il problema della mancanza di un clock in RPi si è equipaggiato il sistema con un modulo GNSS. Il modello, fabbricato dalla ditta Ublox, è il GPS EVK-6H; è in grado, tramite la localizzazione satellitare, di fornire una serie di dati tramite stringhe nel formato standard NMEA 0183. Tra le informazioni ricevute, interessano in particolare la latitudine, longitudine, elevazione, data e orario.

Si riporta un esempio di stringa:

1

\$GPRMC, 1 5 5 0 4 2 . 0 0 0 , A, 4 5 2 5 . 0 0 3 6 , N, 0 0 9 0 7 . 6 3 5 8 7 , E, 0 . 0 5 8 , 0 4 1 2 1 7 , , A* 45

Ovvero: Ora UTC 15:50:42, coordinate 45, 25 ° N, 9, 07 ° S, velocità 0, 058m/s, data 4 Dicembre 2017.

La comunicazione con RPi avviene tramite porta seriale USB, data in dotazione con lo strumento.

Fotodiode a quadrante

Per il puntamento del Sole è stato scelto il fotodiode a quadrante (QPD) QP50-6 T08, prodotto dalla First Sensor. Presenta $4 \times 12 \text{ mm}^2$ di superficie attiva, alta sensibilità e bassa dark current. Il picco di risposta spettrale è a $\lambda = 900 \text{ nm}$, mentre al centro della finestra del visibile, a $\lambda = 500 \text{ nm}$, la risposta è 0.3 A W^{-1} , mentre l'efficienza quantica è 0, 7. I collegamenti nella parte posteriore sono 5, di cui 4 per la corrente e uno per il riferimento comune (Ground).

Telescopio

Parte integrante del sistema di detection è l'alloggio del fotodiode, visibile in Figura 6.10. Il sistema è composto da un tubo di 130 mm di lunghezza, 35 mm di diametro esterno e 33 mm di diametro interno. Al suo interno troviamo, in sequenza, il tappo anteriore di chiusura, un pinhole di 4 mm di apertura, un cilindro concentrico anodizzato di 70 mm di lunghezza che funge da spessore, la PCB del fotodiode, un altro cilindro di 50 mm per l'alloggio dei cavi e il tappo di chiusura.

La distanza tra pinhole e fotodiode è 70 mm, mentre il diametro di quest'ultimo è 8 mm. Notiamo che la proiezione del Sole dovuta al pinhole rimane interamente sulla superficie del sensore entro un angolo di osservazione di 3.27 deg.

L'algoritmo di controllo permette il centraggio anche nella condizione in cui il pinhole proietta la luce solo parzialmente sul sensore, come si vede in Figura 6.11. Il caso b), corrispondente ad un angolo di disallineamento di 9.73 deg, rappresenta il caso limite in cui non si può garantire il centraggio automatico. In Figura 6.12 è riportato lo schema del master per realizzare la PCB per il puntamento.

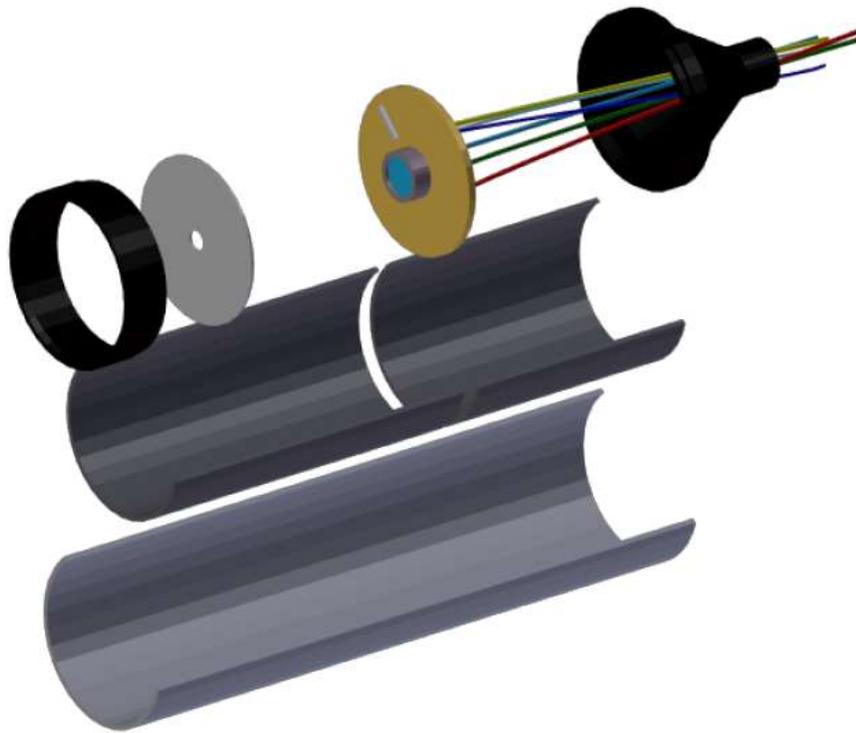


Figura 6.10: esploso del sistema di rivelazione per il centraggio automatico mediante QPD.

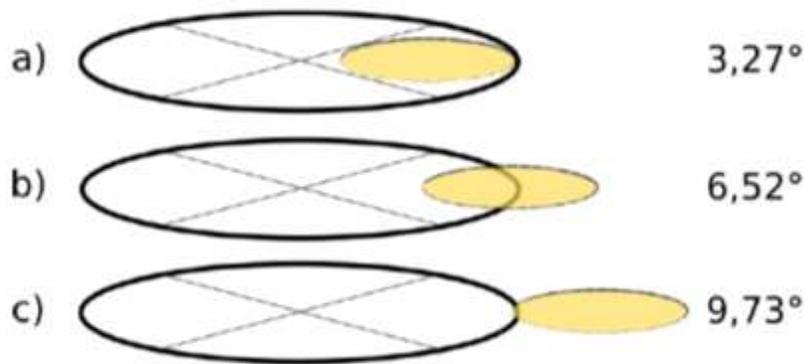


Figura 6.11: Proiezione del disco solare sul QPD in tre diverse condizioni di disallineamento.

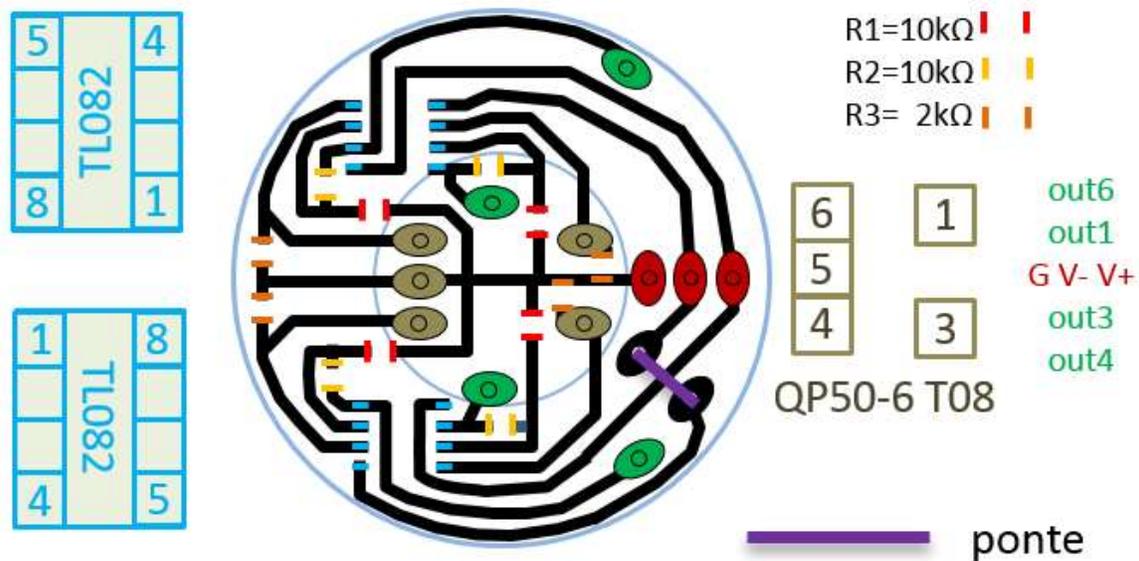


Figura 6.12: Schema del master per la PCB descritta nel testo.

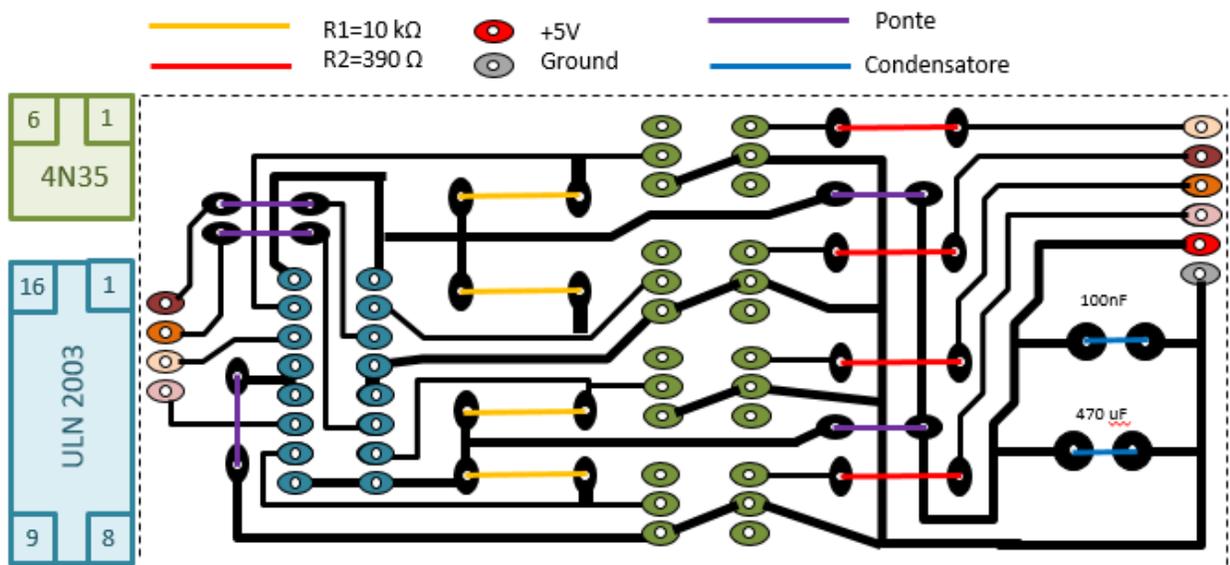


Figura 6.13: Schema della scheda elettronica per il controllo motori. Sono rappresentate le orientazioni degli optoisolatori 4N35 in verde e dell'integrato ULN2003 in azzurro, i 4 ingressi in arrivo da Rpi (a destra) e le 4 uscite per i motori (a sinistra), le resistenze, i condensatori (di cui un elettrolitico da 470 μ f), l'alimentazione da 6,5V e la massa.

Interfaccia di controllo dei motori

Per alimentare i motori ed il sensore a quadrante è stato necessario progettare e realizzare interfacce adatte allo scopo. Le schede PCB sono ricavate usando la tecnica della fotoincisione. Le schede per il controllo dei motori (nella prima versione del tracker) sono circuiti di potenza, rappresentati nella loro forma realizzativa in Figura 6.13.

Calcoliamo ora il momento d'inerzia I per un'asta omogenea di $m=5\text{kg}$ e $l=0,15\text{m}$ (che ben approssima il sistema di ARBOL) con asse di rotazione \perp al proprio asse vale $I = ml^2/12 = 0,01\text{ kg/m}^2$. Quest'approssimazione è ideale per il motore DEC, che avendo la demoltiplica inferiore è quello tra i due che subisce lo sforzo maggiore. Il tempo per compiere un ciclo, corrispondente a $19.85''$, è 0.2s . Quindi abbiamo la velocità di rotazione $\omega = 4,8 * 10^{-4}\text{rad/s}$. L'energia cinetica è $E_k = 0.5 * I * \omega^2 = 1,08 * 10^{-9}\text{ J}$. Volendo che l'accelerazione avvenga in un singolo step da 0.05s , la potenza necessaria è $P = E/t = 2.2 * 10^{-8}\text{ W}$. D'altra parte, la potenza generata è $P = i * V = 0.2 * 6,5 = 1.3\text{W}$, largamente sufficiente.

Circuito di preamplificazione del segnale di fotocorrente

Il fotodiodo a quadrante necessita di un circuito di preamplificazione. La scelta si è rivolta verso un amplificatore in modalità non invertente, con un operazionale standard modello TL082. L'alimentazione fornita all'operazionale è di tipo duale a $+12\text{V}$, $=$, -12 V , ed è fornita dall'alimentatore esterno utilizzato anche per ARBOL e che trova alloggiamento nel quadro posto a controbilanciare la strumentazione ottica e solidale all'asse verticale.

Sulla base di misure preliminari si è stabilito che in generale quando il Sole è perfettamente centrato sul QPD, l'ADC legge in ingresso da ogni quadrante circa 0.96V . Si è deciso di operare in maniera tale che il riallineamento avvenga ogni volta che la differenza di tensione tra due coppie di quadranti sia maggiore di 3mV .

L'algoritmo di puntamento

In Figura 6.14 viene schematizzato sotto forma di diagramma di flusso il funzionamento dell'algoritmo di puntamento sviluppato.

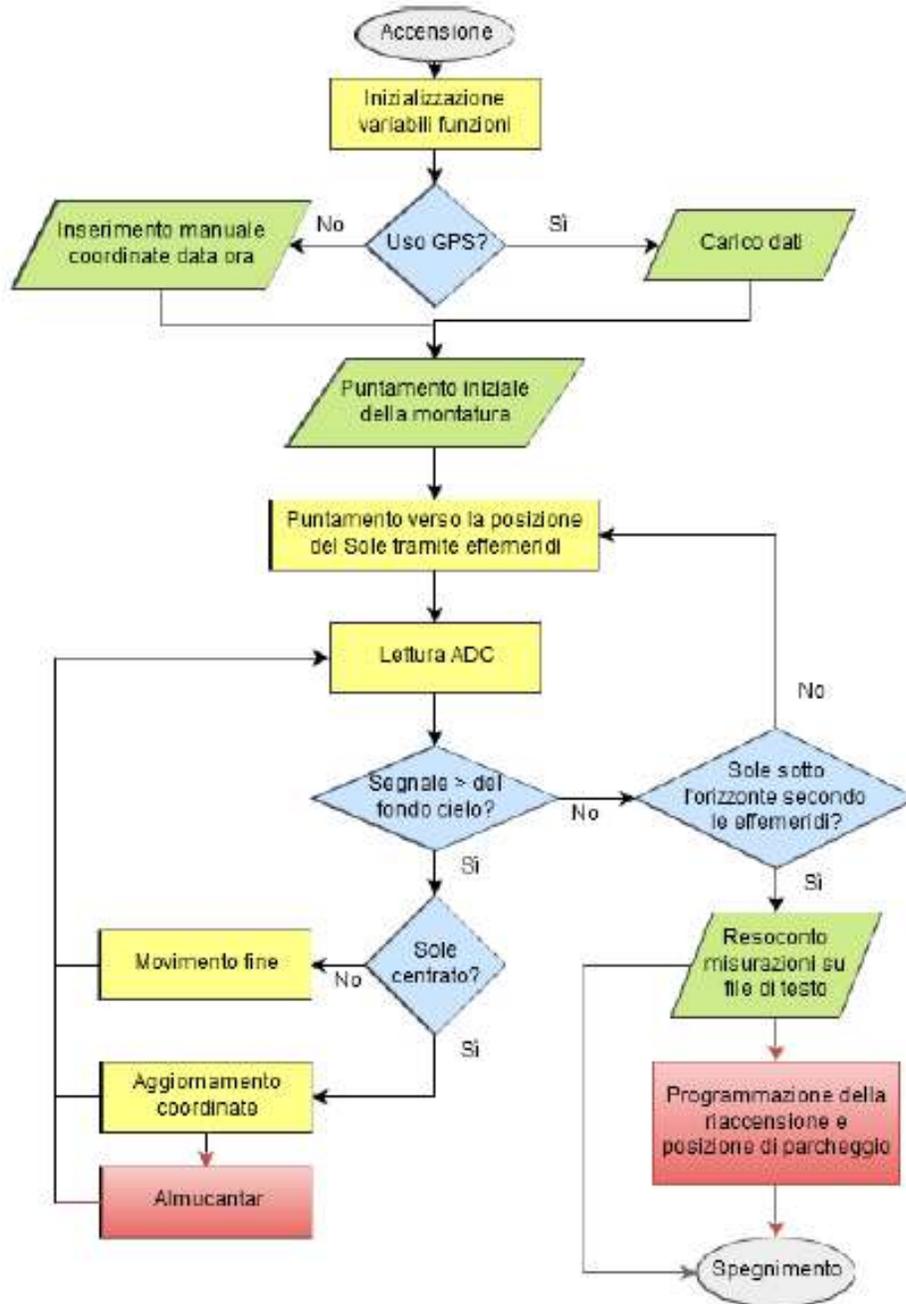


Figura 6.14: Diagramma di flusso che esemplifica l'algoritmo per il puntamento automatico.

Il software che governa il puntamento e il movimento si compone di diversi blocchi logici:

- Gestione del ricevitore GNSS per la determinazione dell'ora e della posizione della stazione. Tale dispositivo viene interrogato giornalmente all'avvio del software e permette di recuperare la posizione dello strumento in coordinate geografiche WGS84. Tali coordinate sono necessarie per elaborare in qualsiasi momento della giornata la posizione del sole. Inoltre all'avvio del software viene recuperata l'ora dal ricevitore GNSS in modo

aggiornare l'ora di sistema ed in ogni momento avere le acquisizioni degli strumenti sincronizzate.

- Gestione del convertitore analogico digitale Adafruit ADS1115 per l'acquisizione dei segnali dal fotodiode a quadrante mediante le librerie python fornite dal costruttore. Per mezzo delle librerie Adafruit si acquisiscono i segnali dai quattro quadranti in digitale e mediante combinazione dei medesimi sull'asse orizzontale e verticale si determina lo sbilanciamento sui sensori in modo da determinare la direzione di spostamento.
- Gestione del server INDI. Al fine di comandare la montatura mediante il controllore Synscan, abbiamo sviluppato una serie di comandi (raccolti nella libreria gestione_indi) per implementare in software client che connettendosi al server (residente sulla medesima macchina) impartisce i comandi specifici per la montatura EQ3.
- Gestione dei file di log. Il software dedicato alla movimentazione scrive continuamente sullo standard output (video) quali sono i comandi impartiti istante per istante. In questo modo durante il funzionamento è possibile vedere i valori di tutti e quattro i quadranti e quale movimento incrementale viene impartito ai motori. Tutti i messaggi vengono anche inviati ad un file di log con indicazione dell'ora in cui viene generato il comando in modo da poter eseguire eventuali debug a seguito di anomalie.
- Funzioni di conversione coordinate. La libreria pysolar utilizza un sistema di coordinate altazimutali mentre la montatura e le librerie INDI utilizzano un sistema di coordinate equatoriali, per tale ragione è stato necessario sviluppare una serie di librerie per il passaggio da un sistema di coordinate all'altro.
- Riposizionamento a termine giornata. Al termine della giornata di osservazioni vi è una funzione che si occupa del riposizionamento dello strumento alla prima posizione registrata il giorno precedente. Così facendo si riesce a tenere in considerazione anche l'orografia del punto di osservazione ed avviare l'acquisizione solamente al sorgere del sole nel punto specifico (cmq i dati sono significativi solo al di sopra dei 10° gradi).

7. DAT: descrizione delle attività e dei risultati

Al fine di una migliore comprensione dell'apporto tecnico, scientifico e del corrispondente trasferimento tecnologico, di seguito si dettaglia l'attività svolta in maniera trasversale rispetto ai WP, che sono stati analizzati precedentemente.

7.1 Uso di modelli di trasporto radiativo e di misure pregresse per l'individuazione dei requisiti di ARBOL

L'individuazione di requisiti e specifiche tecniche preliminari alla progettazione di nuova strumentazione, come nel caso di SRS e ARBOL, risulterebbe molto complessa in assenza di una stima a priori delle grandezze da misurare. Senza tale stima, il rischio è di sviluppare strumenti inadatti agli obiettivi dell'UdR e al sito di misura.

Fortunatamente, la raccolta pregressa di serie di misure da parte di ARPA Valle d'Aosta, così come la stima modellistico-previsionale, possono essere una base di partenza ideale per testare virtualmente strumenti e algoritmi, prima della loro effettiva costruzione e applicazione al mondo reale.

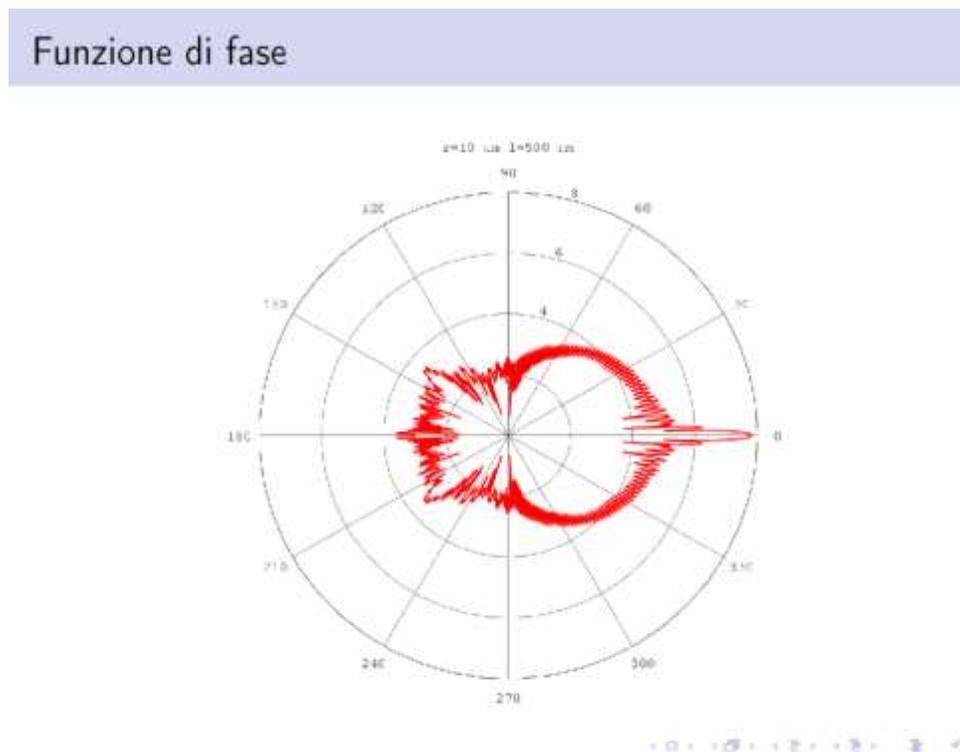


Figura 7.1: Esempio di funzione di fase (raggio incidente da sinistra).

In una prima fase, dunque, le leggi del trasporto radiativo in atmosfera sono state utilizzate per comprendere quali parametri siano realmente ottenibili da uno strumento quale ARBOL e quali siano, invece, possibili fattori di interferenza.

Allo scopo, ARPA ha compiuto alcune simulazioni sfruttando la teoria di Mie-Debye, ovvero l'implementazione delle equazioni di Maxwell su particelle sferiche (un modello semplificato delle particelle di aerosol) di dimensioni simili alla lunghezza d'onda della radiazione incidente. Inserendo nelle equazioni l'indice di rifrazione complesso tipico del materiale considerato, il raggio della particella e la lunghezza d'onda della radiazione, è possibile ottenere la funzione di fase, quantificando così come il raggio incidente sulla particella viene deflesso ai diversi angoli, come nella figura che segue:

Simulazione di partenza

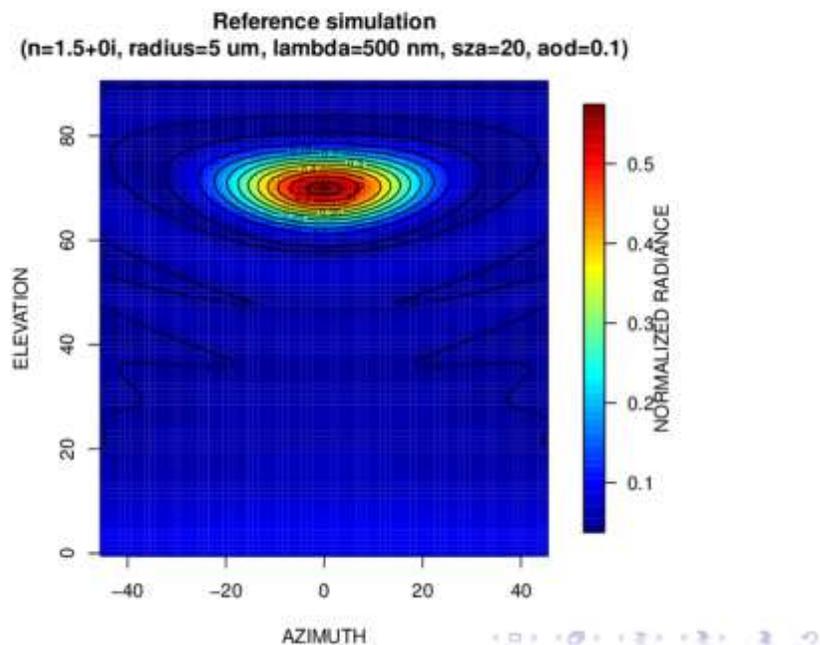


Figura 7.2: Simulazione della radianza normalizzata misurabile a terra.

Tale funzione cambia con la lunghezza d'onda considerata e il raggio della particella, entrambi parametri da tenere in considerazione per la progettazione di ARBOL. Questo strumento, in effetti, sarà sensibile alla distribuzione angolare della radiazione proveniente dal cielo, che altro non è che una "integrazione" su tutta l'atmosfera e su tutte le particelle ivi presenti della funzione di cui sopra.

Tuttavia, anziché ragionare su singole particelle, nel mondo reale è preferibile utilizzare grandezze macroscopiche direttamente misurabili, come l'intensità della radiazione diffusa dal cielo e la radiazione diretta dal Sole. Una variabile particolarmente utile allo scopo, poiché adimensionale (e dunque indipendente alla sensibilità assoluta dello strumento), è il rapporto tra queste ultime due grandezze, detta "radianza normalizzata". Sarà questa la variabile al cuore dell'algoritmo di inversione di ARBOL. La radianza normalizzata può essere simulata con codici di trasporto radiativo, ovvero programmi elaborati in grado di prevedere l'intensità e la direzione della radiazione solare, una volta specificate le caratteristiche dell'atmosfera. Una di queste simulazioni è raffigurata in Figura 7.2.

Il colore rappresenta l'intensità della radiazione, la scala orizzontale la direzione di provenienza in azimuth (considerando il Sole all'angolo zero) e la scala verticale l'elevazione rispetto all'orizzonte. Modificando leggermente le caratteristiche dell'atmosfera simulata, è possibile capire quali siano i maggiori fattori di influenza sulle misure di ARBOL (analisi di sensitività). Tali fattori sono stati "perturbati" all'interno del loro campo di variabilità, estratto dalle misure 2012-oggi di un fotometro solare installato presso la sede di ARPA, al fine di limitare l'analisi a un range di valori realistici per la Valle d'Aosta.

Dall'analisi possiamo ricavare le seguenti conclusioni:

- È importante caratterizzare – sia in sensibilità assoluta e campo di vista, sia in risposta spettrale – i singoli bolometri che costituiranno ARBOL, in modo che i dati registrati da ognuno di essi siano confrontabili.
- È necessaria una misura indipendente dello spessore ottico dell'aerosol (AOD), da cui dipende la distribuzione angolare della radiazione. Tale misura indipendente verrà offerta dal secondo strumento montato sull'inseguitore solare, ovvero SRS.
- La procedura di inversione dovrà essere effettuata simultaneamente su diverse variabili, utilizzando contemporaneamente le misure alle diverse lunghezze d'onda e ai diversi angoli, in modo da massimizzare l'informazione disponibile e aumentare l'accuratezza del retrieval.
- Potrà essere necessario ipotizzare alcuni valori per grandezze non direttamente misurabili, come ad esempio l'albedo superficiale (la frazione di radiazione riflessa dal terreno). Questa grandezza, in effetti, si è rivelata un fattore di interferenza importante durante le simulazioni.

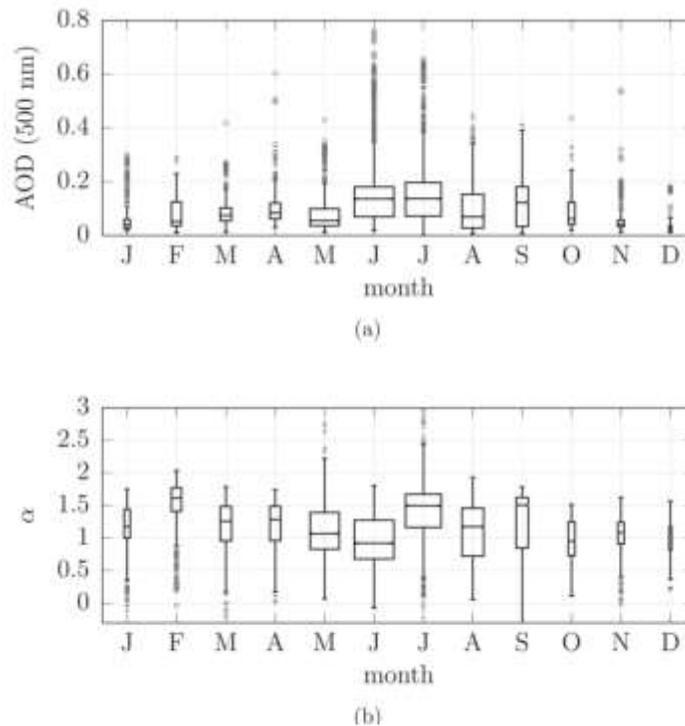


Figura 7.3: Sopra: spessore ottico dell'aerosol nei diversi mesi (gennaio-dicembre). Sotto: esponente di Angstrom.

Come già citato, si è condotta una analisi della serie pregressa di misure aerosoliche ottenute attraverso fotometria solare, utile a determinare l'ordine di grandezza delle variabili che verranno poi misurate dalla strumentazione sviluppata nell'ambito dell'UdR. A tale scopo, sono stati presi in esame i dati "climatologici" (2012-oggi) ottenuti da un fotometro solare installato presso la sede ARPA.

I grafici in Figura 7.3 raffigurano i valori medi dello spessore ottico dell'aerosol (AOD) nei diversi mesi dell'anno, da cui si deduce il basso carico di polveri, in media, presente in Valle d'Aosta. Tale risultato deve essere tenuto in conto per la progettazione e per la taratura di SRS e ARBOL, che dovranno avere la sensibilità sufficiente per misurare valori di AOD generalmente bassi e, aspetto ancora più stimolante, per calcolare accuratamente differenze tra tali spessori ottici, ovvero valori ancora minori. Tuttavia, benché il carico medio di aerosol sia generalmente basso, AOD elevati possono comunque essere misurati in Valle d'Aosta in seguito al trasporto di polveri sahariane o di ceneri di incendi, anche da altri continenti.

Da notare, infine, che il ciclo dello spessore ottico dell'aerosol (massimi estivi e minimi invernali) è opposto a quello, più noto, delle concentrazioni di PM al suolo, caratterizzato da un massimo invernale e un minimo estivo. Ciò è causato dal fatto che il carico complessivo di particolato in

atmosfera è maggiore in estate, tuttavia in inverno le inversioni termiche e la bassa quota dello strato rimescolato favoriscono l'accumulo e aumentano le concentrazioni in prossimità del suolo. Il secondo grafico, riportante il coefficiente di Angstrom (un indicatore della variabilità spettrale dello spessore ottico, indirettamente legato alle dimensioni dell'aerosol), illustra la grande variabilità del diametro medio del particolato in Valle d'Aosta, con particelle sia molto piccole (processi di combustione locali e remoti) sia molto grandi (polveri da risollevarimento del suolo o deposizione di polveri sahariane).

7.2 Misura di particolato con strumentazione al suolo, appartenente alle reti di monitoraggio della qualità dell'aria di ARPA VdA

L'analisi dei dati storici di concentrazione al suolo ha consentito di identificare alcune caratteristiche del particolato presente in Valle d'Aosta, ma una spiegazione più esaustiva delle dinamiche di formazione e di trasporto si può ottenere solo combinando questi risultati con quelli prodotti da strumentazione più avanzata che consenta di indagare in tutta la colonna atmosferica. La distribuzione sul territorio delle stazioni di misura consente di avere una maggiore informazione sulla presenza del particolato negli strati bassi dell'atmosfera e di fare alcune ipotesi sull'origine e sulla provenienza del particolato.

Nella mappa seguente sono riportate le stazioni per la misura del particolato in Valle d'Aosta.

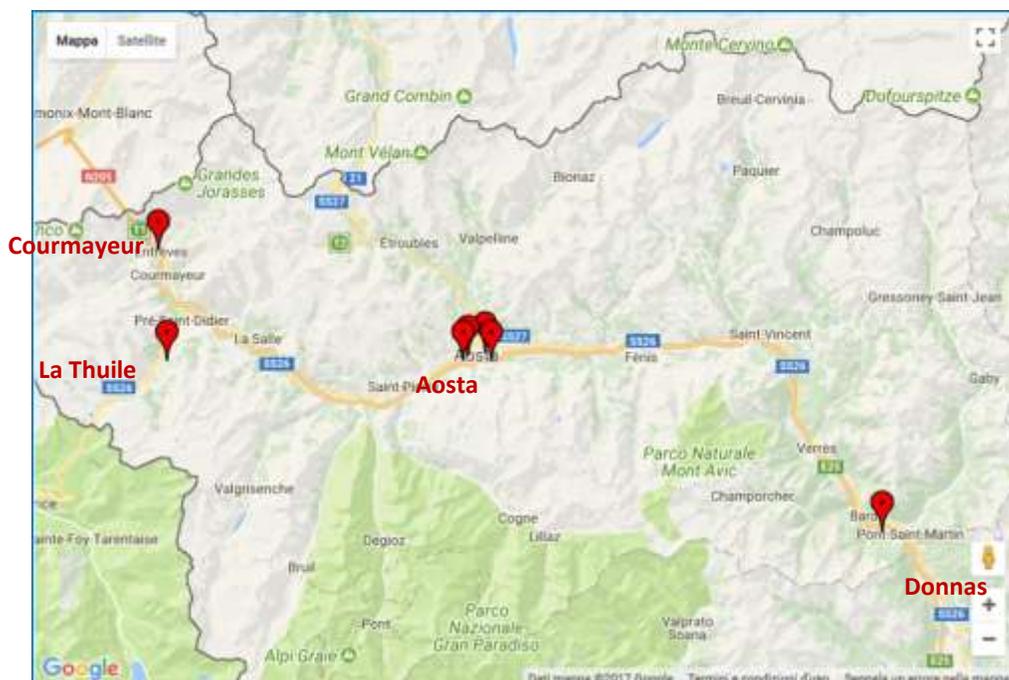


Figura 7.4: Distribuzione delle stazioni per la misura del particolato in Valle d'Aosta.

Ad esempio, il sito di La Thuile è lontano da sorgenti antropiche locali: le concentrazioni misurate forniscono una stima dei valori di fondo ed i valori elevati che vengono misurati sono indice di situazioni anomale, tipicamente derivanti dal trasporto di Saharan dust.

Strumenti per la misura della concentrazione

Gli strumenti utilizzati per la misura nelle stazioni sono OPSIS SM200 e TEOM 1400a.



OPSIS SM200 è uno strumento per la misura automatica della concentrazione media giornaliera con il metodo della attenuazione beta.

Per separare la frazione PM10 o PM2.5, una pompa spinge un flusso controllato di aria attraverso una testa di campionamento. L'aria campionata passa attraverso un filtro, su cui si accumulano le particelle.

Al termine del campionamento, il peso delle particelle accumulate è misurato con il metodo della attenuazione beta: la radiazione beta viene attenuata quando attraversa uno strato sottile di materiale. Si misurano quindi l'attenuazione su un filtro bianco e poi quella sul filtro campionato: dalla differenza si risale alla massa del particolato campionato.

Il peso combinato con il volume totale di aria che attraversa il filtro fornisce la concentrazione media durante il periodo di campionamento (24 ore).

Il TEOM 1440a è uno strumento automatico per la misura dei valori medi orari di concentrazione di polveri. La sigla TEOM significa Tapered Element Oscillating Microbalance ed è una tecnologia per misurare in continuo la concentrazione in massa del particolato. È un vero strumento gravimetrico in quanto l'aria ambiente passa con un flusso costante attraverso un filtro che viene pesato ogni 10 minuti e viene calcolata la concentrazione in massa. Inoltre, lo strumento calcola la massa totale accumulata e la media su 30 minuti, 1 ora, 8 ore e 24 ore.



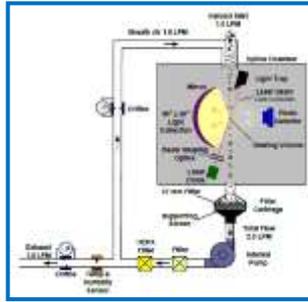
Contatori ottici di particelle

Per migliorare la conoscenza sul particolato presente in Valle d'Aosta, da qualche anno presso la sede ARPA sono stati installati dei contatori ottici di particelle, che consentono di determinare la distribuzione granulometrica del particolato. Questa informazione è importante perché a diverse granulometrie corrispondono diverse sorgenti e soprattutto diverse proprietà chimico-fisiche cui sono associati determinati livelli di rischio sanitario. Le frazioni più fini sono provenienti principalmente da processi di combustione e risultano in generale più nocive per l'essere umano.

Gli strumenti utilizzano la spettrometria ottica che permette di determinare il numero e la dimensione delle particelle utilizzando l'analisi della luce diffusa dalle singole particelle:

- Il numero di particelle viene misurato in base al numero di impulsi di luce diffusa.
- Il diametro della particella viene determinato in funzione dell'ampiezza dell'impulso della luce

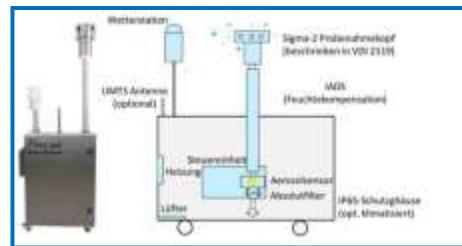
Gli strumenti a disposizione di ARPA sono un TSI 3330 e un PALAS Fidas 2000.



L'Optical Particle Sizer modello 3330 della TSI Incorporated è un contatore ottico di particelle che opera nell'intervallo dimensionale 0,3-10 μm su un massimo di 16 canali dimensionali impostabili dall'operatore. L'OPS lavora sul principio dello scattering ottico delle singole particelle.

Le particelle campionate all'interno dello strumento con una portata di 1 l/min vengono illuminate da un fascio laser; tramite il numero e l'altezza (angolo di scattering) dei segnali rilevati dal Photo detector, si ottiene il numero di particelle per ognuna delle classi dimensionali impostate.

L'Optical Aerosol Spectrometer PALAS Fidas 2000 fornisce la valutazione quantitativa del particolato, suddiviso in 4 frazioni granulometriche, PM1, PM2.5, PM4, PM10 e dotato di certificazione di equivalenza con i metodi ufficiali.



Lo strumento ha una portata di circa mq. 0,3 m³/h ed è dotato di una testa di campionamento che consente misurazioni rappresentative anche in condizioni di forte vento.

Lo strumento riesce a rilevare particelle con diametro pari a 0.18 μm grazie a una fonte di luce bianca a led, al miglioramento dell'analisi del segnale (convertitore analogico digitale logaritmico).

7.3 Campagne di misura dirette di aerosol in atmosfera e profili verticali di aerosol ottenuti con strumentazione LiDAR

ARBOL e SRS, essendo basati sulla misura della radiazione solare diffusa e diretta da terra, saranno in grado di stimare il carico complessivo di aerosol, nonché le sue caratteristiche, sull'intera colonna atmosferica. Benché spesso la frazione più consistente di aerosol si trovi nei primi livelli atmosferici vicino al suolo (strato di rimescolamento), dove sono presenti le maggiori sorgenti antropiche, la sola stima colonnare operata da ARBOL e SRS non è sufficiente a determinare con certezza dove si trovi lo strato di aerosol misurato. L'uso di più strumenti lungo un transetto verticale, tuttavia, può offrire informazioni utili a quantificare la frazione di particolato presente tra le quote delle diverse stazioni di misura.

Un approccio complementare a quello sopracitato e, per questo motivo, utile per validare gli algoritmi di ARBOL e SRS è la misura *in situ* del particolato operata a diverse quote attraverso strumenti portatili installati su palloni aerostatici. La riduzione dei fondi previsti per l'UdR, tuttavia, rende problematica l'organizzazione di campagne ad hoc. Per questo motivo, è stata finora percorsa una seconda alternativa per il tracciamento di profili verticali, cioè l'uso di strumentazione per il telerilevamento dell'aerosol già operante presso ARPA.



Figura 7.5: Il LiDAR-ceilometer installato alla stazione di misura di Saint-Christophe (sede ARPA).

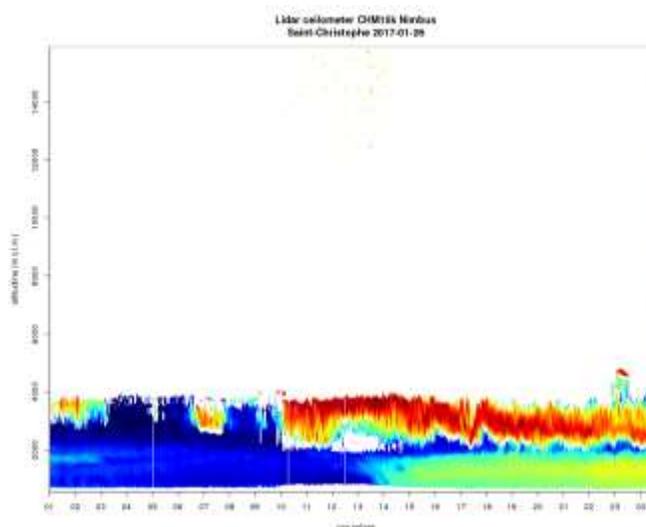


Figura 7.6: Profilo di esempio da LiDAR-ceilometer per il giorno 26 gennaio 2017.

Il LiDAR (Light Detection And Ranging)-ceilometer è uno strumento di misura ground-based progettato per emettere un raggio laser ad impulsi (emissione nella banda infrarossa) e per misurarne l'«eco» di ritorno. Tale segnale raggiunge quote di 15000 m e viene principalmente deflesso (e riflesso) dalle nubi e dalle particelle di aerosol. Sfruttando il tempo di ritorno degli impulsi, è possibile associare ad ogni segnale di ritorno una quota e, dunque, ottenere un profilo degli assorbitori atmosferici.

Lo strumento è rappresentato in Figura 7.5, mentre un profilo di esempio è raffigurato in Figura 7.6. In particolare, quest'ultima si riferisce all'inizio di un interessantissimo episodio di forte superamento dei limiti di PM avvenuto a fine gennaio 2017 (giorni 26-29). La figura non è di semplice lettura, ma rivela informazioni importanti per determinare l'origine delle masse d'aria inquinate. Il grafico rappresenta l'evoluzione del segnale di ritorno del ceilometer nel tempo (asse orizzontale) e nello spazio (quota, asse verticale). Le aree in blu (basso segnale di ritorno) indicano l'assenza di aerosol, quelle in rosso la presenza di nubi d'acqua (massimo segnale di ritorno; il laser del ceilometer non può attraversare le nubi, per questo motivo il resto della figura è bianca). L'area in verde-giallo (segnale di ritorno medio) indica la presenza di aerosol: dalla figura si può, dunque, comprendere che uno strato alto circa 2000 m (e, perciò, non di origine locale) è arrivato sopra Aosta alle ore 14.00. Analisi di tipo modellistico permettono, in aggiunta,

di dimostrare che la zona di provenienza dello strato è la Pianura Padana, dove in quegli stessi giorni le concentrazioni erano elevatissime (quasi $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$), a causa delle elevate emissioni e di particolari condizioni meteorologiche in grado di favorire una forte stabilità atmosferica. Inoltre, analisi chimiche al suolo rivelano la presenza di particolato secondario (nitrati e ammonio), non direttamente emesso in Valle d'Aosta e generalmente poco presente nella nostra regione. Questo episodio è rappresentativo dell'importanza della sinergia tra strumentazione e analisi di diverso tipo per una maggiore comprensione delle dinamiche atmosferiche, a cui sicuramente l'UdR GAIA potrà dare un contributo fondamentale.

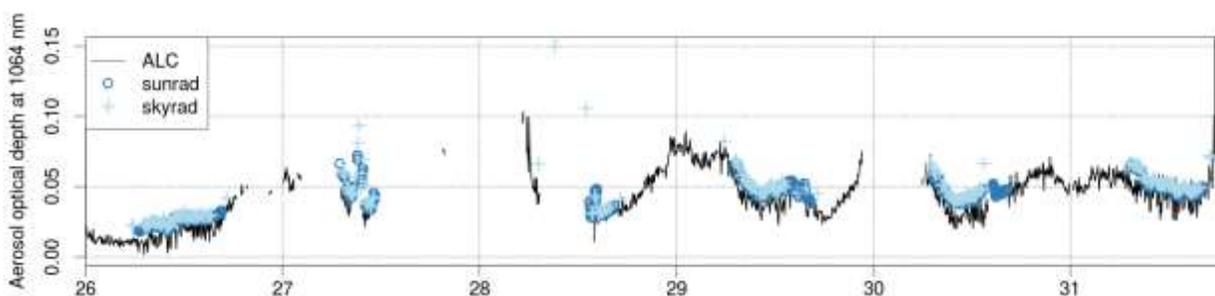


Figura 7.7: Spessore ottico dell'aerosol misurato con un fotometro solare presso la sede ARPA (punti azzurri) e con il LiDAR-ceilometer (linea continua nera). Il fotometro funziona solo di giorno quando il Sole è visibile, mentre il ceilometer è attivo anche durante la notte, purché non siano presenti nubi basse.

In attesa della messa in funzione di un primo dimostratore (ARBOL+SRS), sono stati già predisposti gli algoritmi per un uso sinergico di strumenti per misure colonnari e del LiDAR-ceilometer (vedi Figura 7.7).

A tale scopo, sono state inizialmente impiegate le misure ottenute con un fotometro solare a bande strette installato dal 2012 presso ARPA. L'algoritmo verrà poi adattato agli spettri acquisiti con SRS. In sintesi, il ceilometer è stato tarato con la tecnica di Rayleigh utilizzando il segnale noto delle molecole d'aria (durante le notti serene) e la retrodiffusione del raggio laser è stata convertita in una grandezza (coefficiente di estinzione) direttamente rapportabile alla misura del fotometro solare (lo spessore ottico è l'integrale sulla quota del coefficiente di estinzione). In questo modo, è stato possibile confrontare lo spessore ottico ottenuto da ceilometer e fotometro, validando così i profili verticali di estinzione ricavabili con il ceilometer. Sarà di particolare interesse confrontare tale profilo con la differenza tra le misure di SRS e ARBOL lungo un "transetto verticale" tra due o più stazioni.

Infine, come già anticipato, le tecniche qui esposte saranno utili per l'interpretazione del dato ricavato da ARBOL e SRS. Ad esempio, sarà possibile discriminare l'effetto dell'inquinamento locale dall'arrivo di particolato da sorgenti remote (aerosol dalla Pianura Padana, polveri minerali dal deserto del Sahara, ceneri di incendi, ecc.).

7.4 Misure di particolato depositato al suolo e conservato nella criosfera

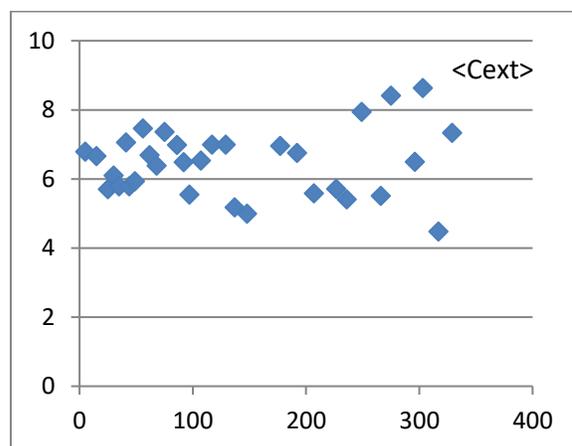
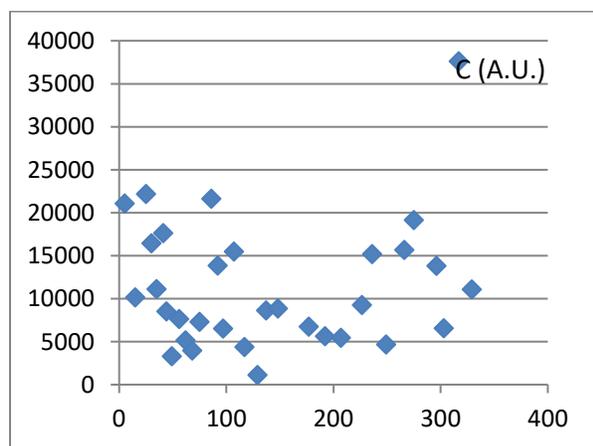
Si riportano i risultati delle analisi dei risultati di misure SPES svolte a Milano su polveri in acqua di fusione da campioni di neve dell'accumulo stagionale estratti dal carotaggio eseguito sul Ghiacciaio del Rutor il 20 giugno 2017. Si riporta inoltre il confronto con i risultati delle corrispondenti analisi chimiche svolte presso i laboratori dell'Università Cà Foscari di Venezia e i dati su eventi di polvere sahariana ricavata dal modello DREAM8b del BSC di Barcellona.

I dati riguardano lo strato di neve accumulato durante la stagione autunno-inverno-primavera 2016-2017. Il carotaggio è stato eseguito sul plateau superiore del Rutor, a quota 3200 mslm, mediante un carotiere appositamente progettato e realizzato presso l'Università di Milano. I campioni sono stati trasportati perfettamente congelati fino al laboratorio EUROCOLD di Milano Bicocca. Lì sono stati processati dividendo longitudinalmente in due parti ciascun spezzone di carota, separando i diversi strati evidenti e raccogliendo una aliquota di neve in contenitori perfettamente puliti. Sono stati separati 40 strati rilevanti, ciascuno dei quali ha fornito qualche cc di ghiaccio da analizzare. La procedura di preparazione è avvenuta a una temperatura di -25 °C per garantire la perfetta conservazione del campione.

I campioni sono stati poi fusi uno alla volta e misurati mediante lo strumento SPES presente presso la camera pulita di EUROCOLD.

Successivamente i campioni sono stati trasferiti a Venezia, dove sono stati sottoposti a analisi chimica seguendo le procedure standard del laboratorio di glaciologia dell'Università Cà Foscari.

I grafici riportano in ascissa la profondità (in cm) del campione a partire dalla superficie, in ordinata i seguenti parametri: concentrazione numerica di polveri (C, in unità arbitrarie), valor medio del coefficiente di estinzione ($\langle C_{ext} \rangle$, in micron quadrati), spessore ottico medio $\langle \rho \rangle$ delle singole particelle, varianza di quest'ultimo, stdev. Si noti che, non essendoci alcun riferimento temporale assoluto, la profondità indica il periodo dell'anno in maniera progressiva, senza alcuna calibrazione. In Figura 1 sono riportati i risultati.



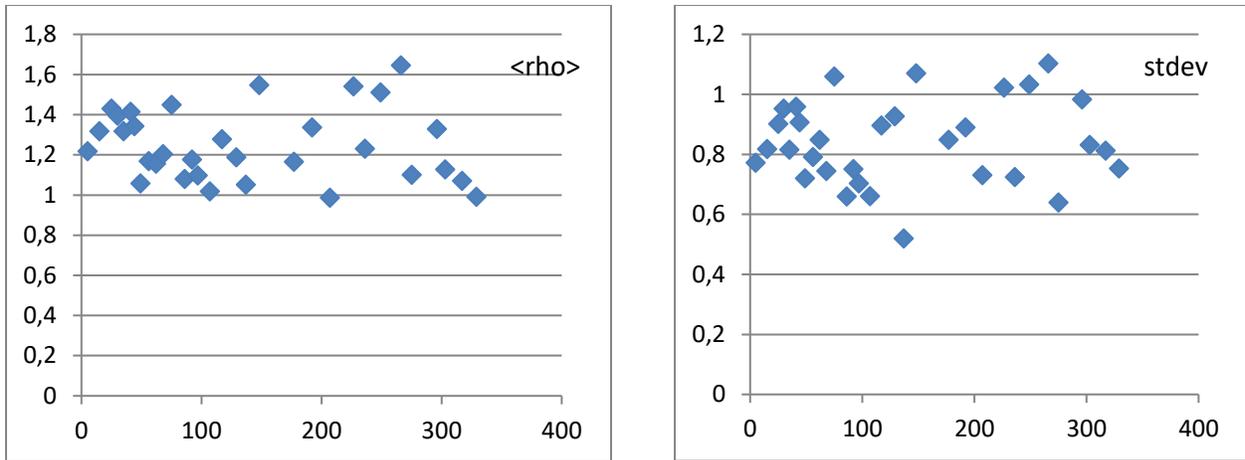


Figura 1: Risultati sintetici delle misure SPES svolte su polveri estratte da carotaggio dello strato di neve accumulata durante la stagione 2016/2017.

Si è quindi proceduto ad una analisi delle proprietà ottiche delle polveri in atmosfera, ricavando lo spessore ottico della nuvola di polvere in atmosfera mediante il prodotto $C \times \langle C_{ext} \rangle$. In Figura 2 a sinistra si riporta questo parametro in funzione della stessa ascissa usata in Fig. 1. Questo risultato mostra l'andamento nel tempo dell'effetto di estinzione della luce da parte del particolato in atmosfera, prima di venire depositato al suolo tramite la deposizione secca permessa dalla neve.

Inoltre, da un'analisi delle correlazioni tra gli ultimi due grafici di Fig. 1, si è osservato come $\langle \rho \rangle$ e la corrispondente deviazione standard siano direttamente proporzionali; questo fatto è evidenziato dal grafico in Fig. 2 a destra, che mostra il rapporto tra le due quantità prese in esame che rimane pressoché costante.

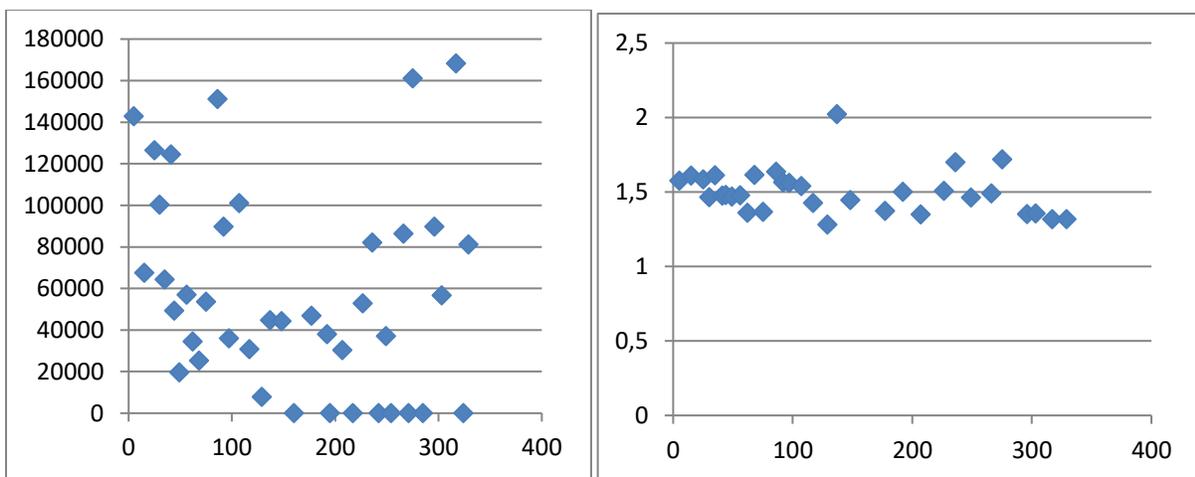


Figura 2: Grafici del prodotto $C \times \langle C_{ext} \rangle$ (figura a sinistra) e del rapporto tra $\langle \rho \rangle$ e la sua deviazione standard (a destra).

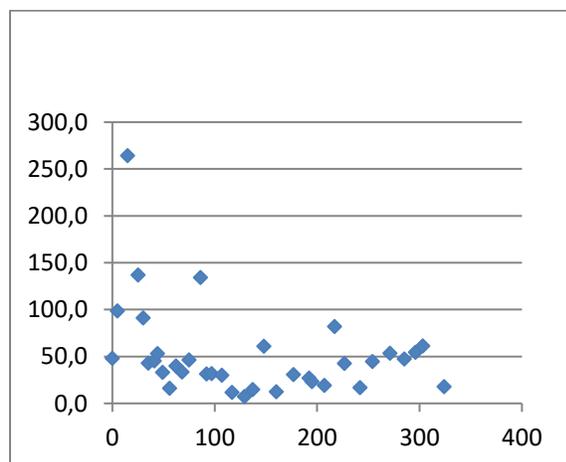
L'andamento di $C \times \langle C_{ext} \rangle$ mostra una notevole riduzione dello spessore ottico dello strato di aerosol nel periodo intermedio. Questo periodo corrisponde ragionevolmente al periodo invernale, mentre nel periodo precedente e successivo l'effetto di estinzione della luce solare in atmosfera cresce fino a un fattore 3-4 volte. Confrontando il risultato con quanto riportato in Fig. 1, si nota che questa variazione è attribuibile soprattutto ad una riduzione della concentrazione nello stesso periodo, piuttosto che ad una eventuale variazione delle proprietà ottiche delle polveri.

Da un punto di vista generale si può osservare come tutti i risultati mostrino una sostanziale uniformità delle proprietà ottiche della polvere, considerate qui come le proprietà ottiche dell'insieme di grani misurati dai campioni di neve. Questo si nota per l'assenza di andamenti marcati dei vari parametri durante la stagione di accumulo, come anche dalla forte correlazione tra il valor medio di ρ e la sua deviazione standard. L'unica variazione dei parametri durante l'anno è visibile dalla maggiore dispersione dei valori di $\langle C_{ext} \rangle$ in autunno (a destra nel grafico) rispetto alla primavera (a sinistra nel grafico).

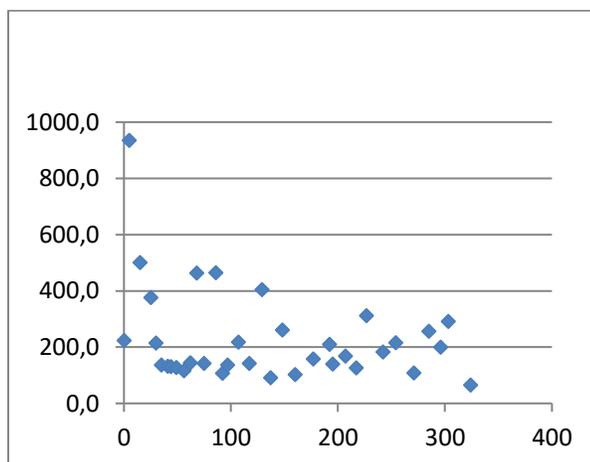
Si noti che per la natura stessa dello studio svolto sui campioni di neve, è qui esclusa la stagione estiva.

Si riportano qui sotto i grafici relativi alle specie chimiche indicate. Le ascisse sono le stesse di sopra.

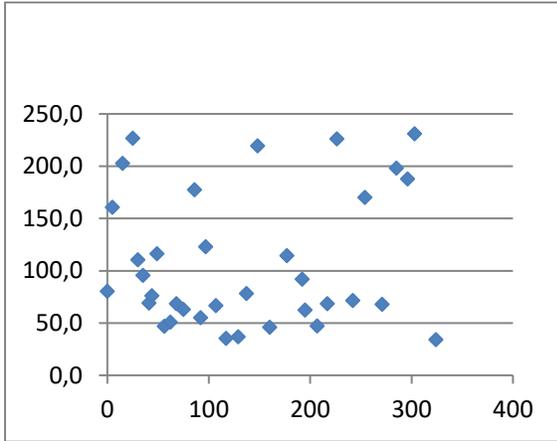
NH4 (ng/ml)



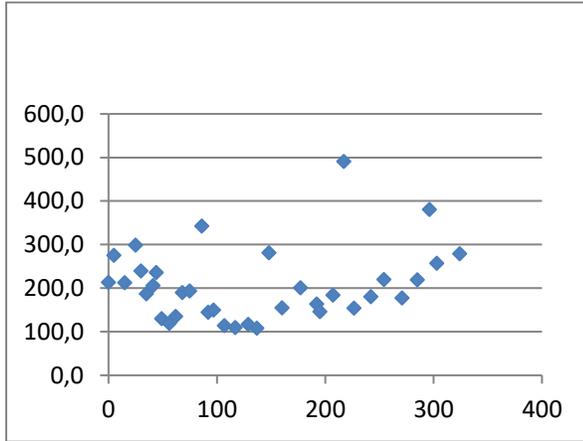
NO3 (ng/ml)



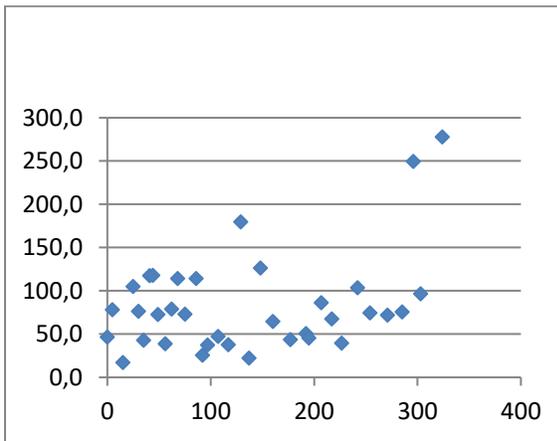
SO4 (ng/ml)



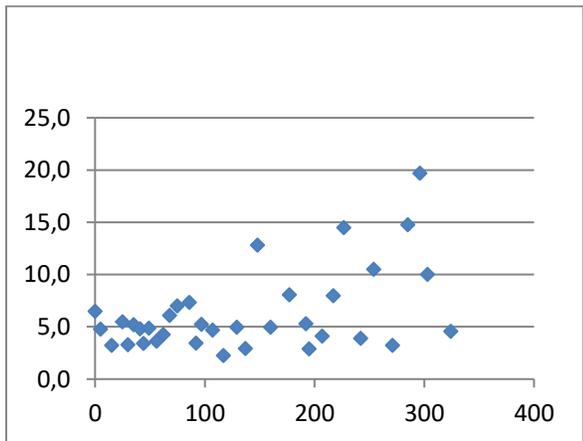
C1-formic (ng/ml)



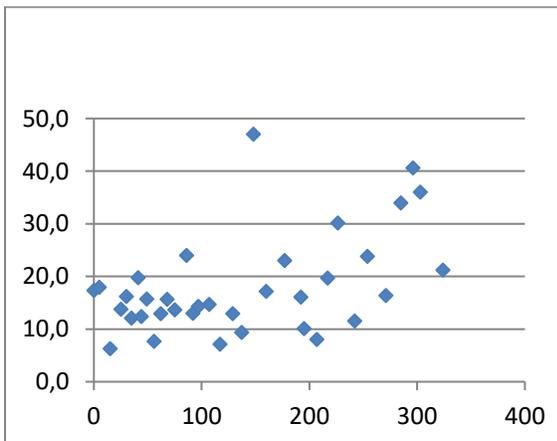
C2-acetic (ng/ml)



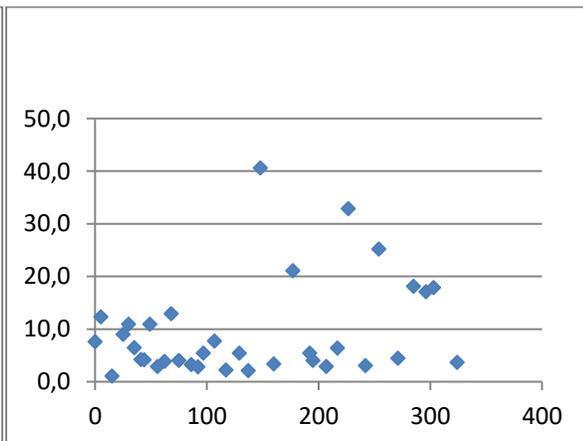
C2-glycolic (ng/ml)



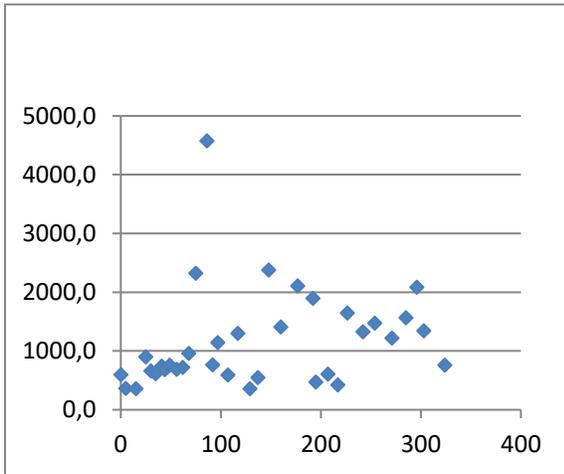
C2-oxalic (ng/ml)



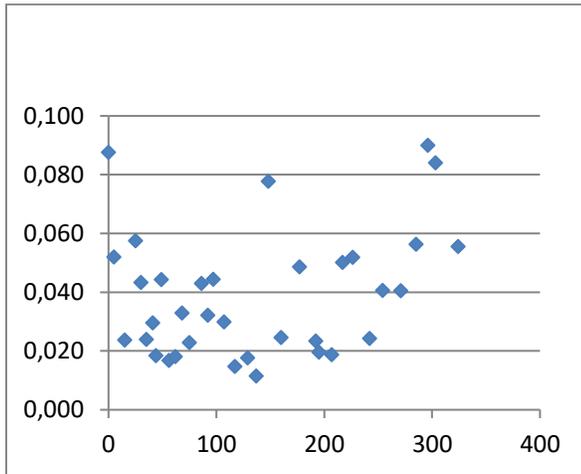
C6-adipic (ng/ml)



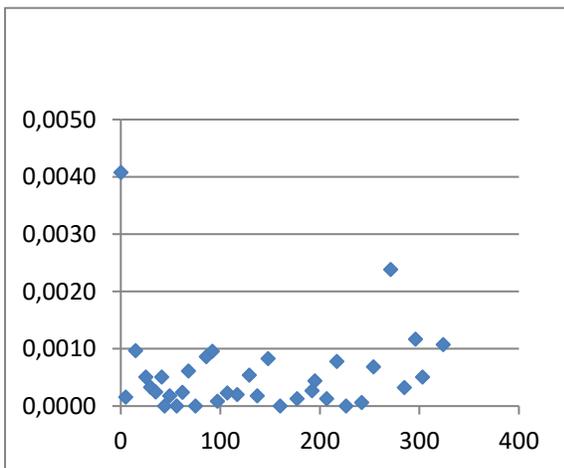
Levo (pg/ml)



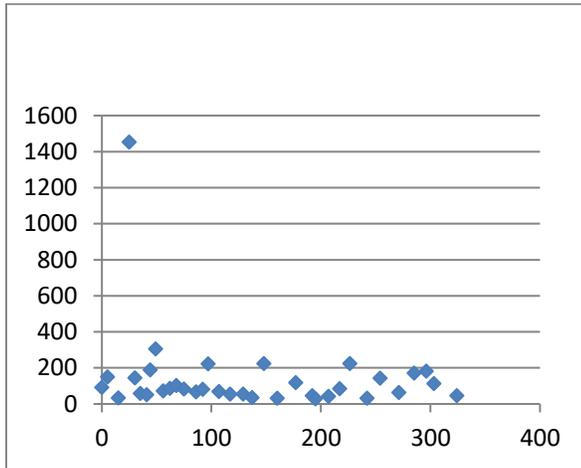
Li (ng/ml)



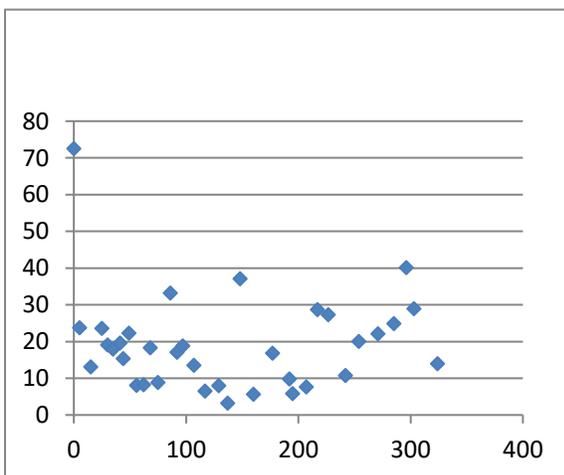
Be (ng/ml)



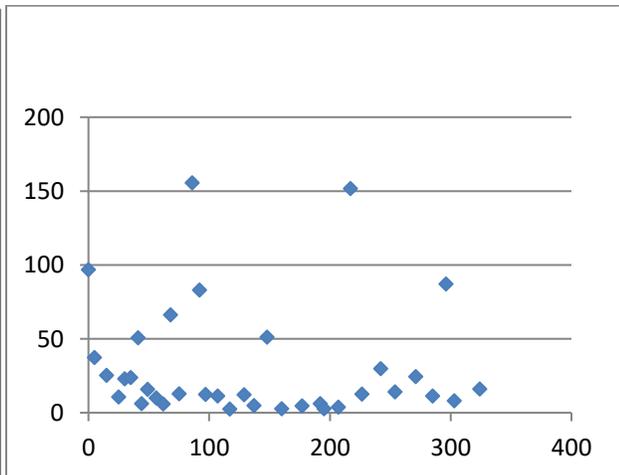
Na (ng/ml)



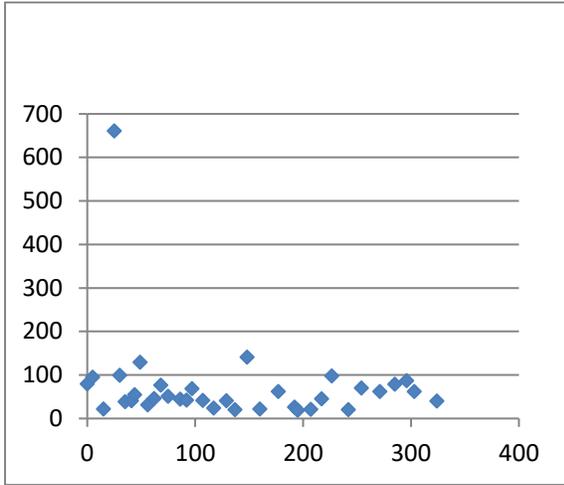
Mg (ng/ml)



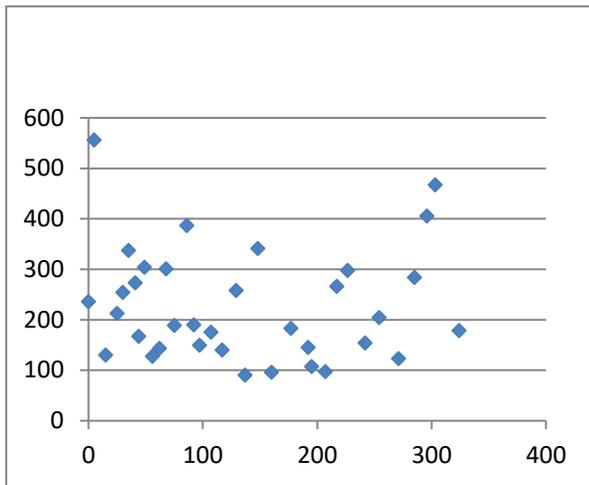
Al (ng/ml)



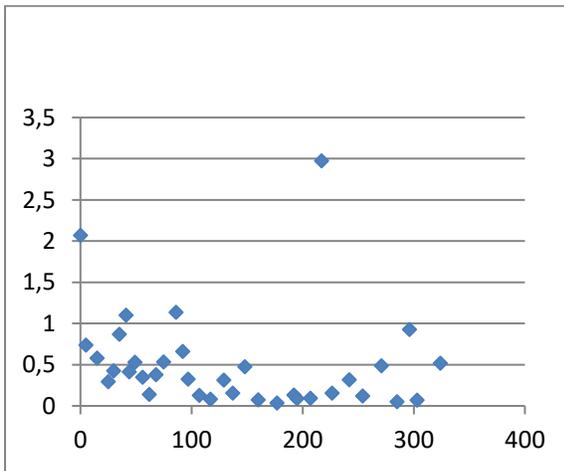
K (ng/ml)



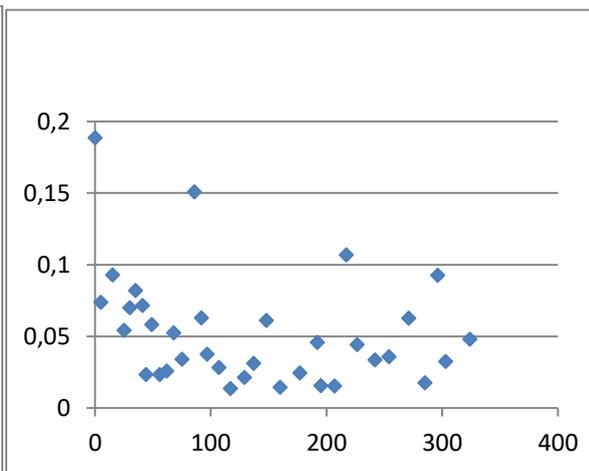
⁴³Ca (ng/ml)



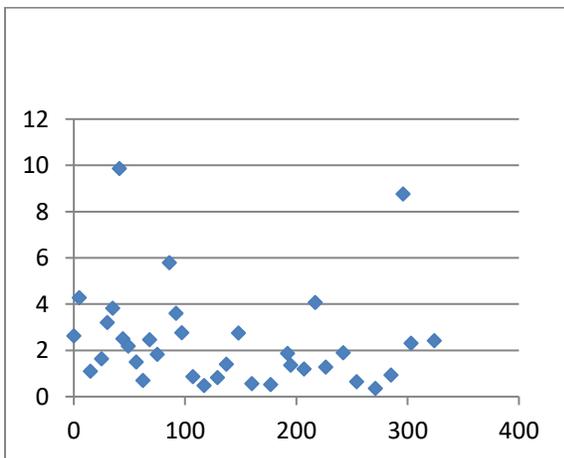
Ti (ng/ml)



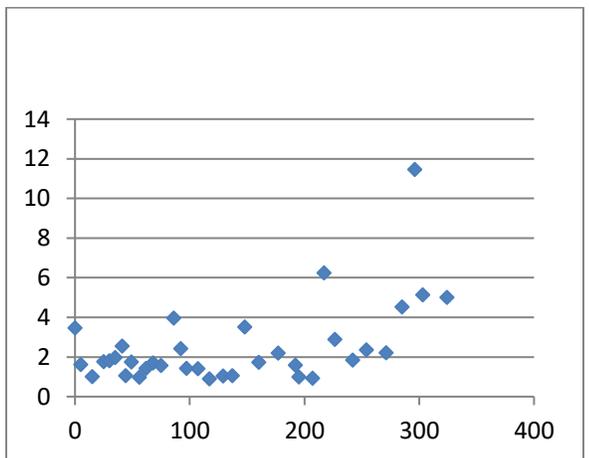
V (ng/ml)



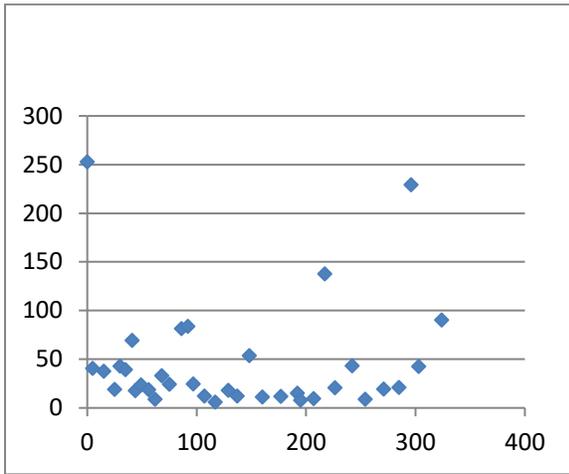
Cr (ng/ml)



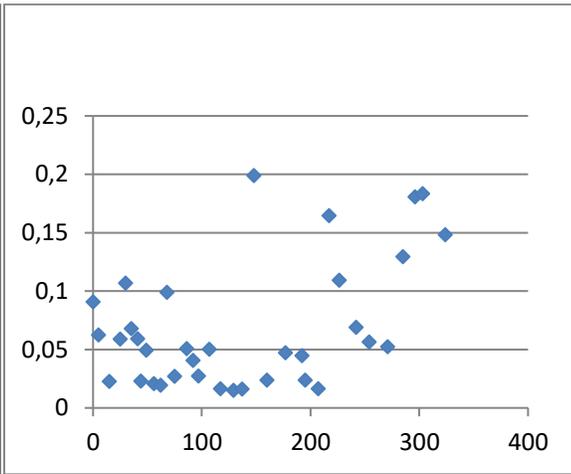
Mn (ng/ml)



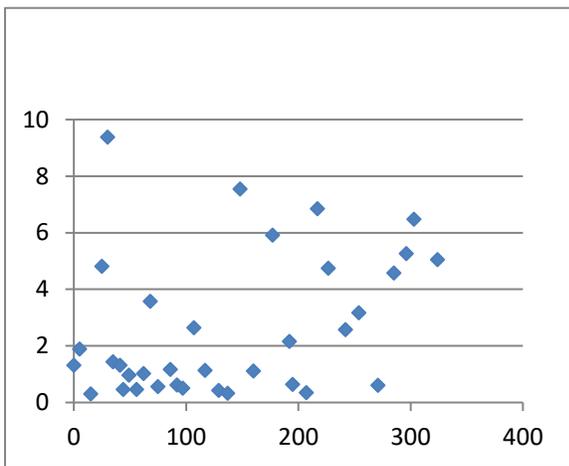
57Fe (ng/ml)



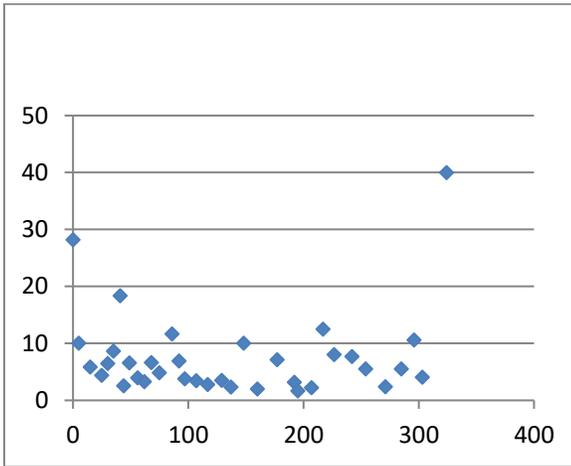
Co (ng/ml)



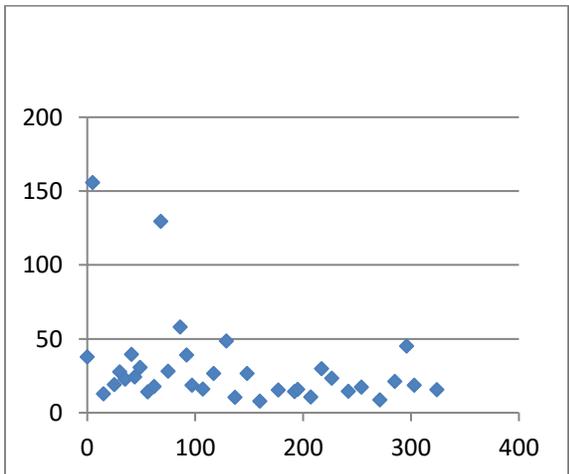
Ni (ng/ml)



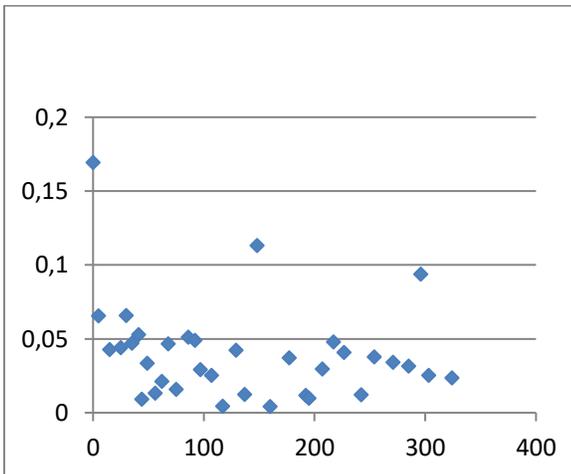
Cu (ng/ml)



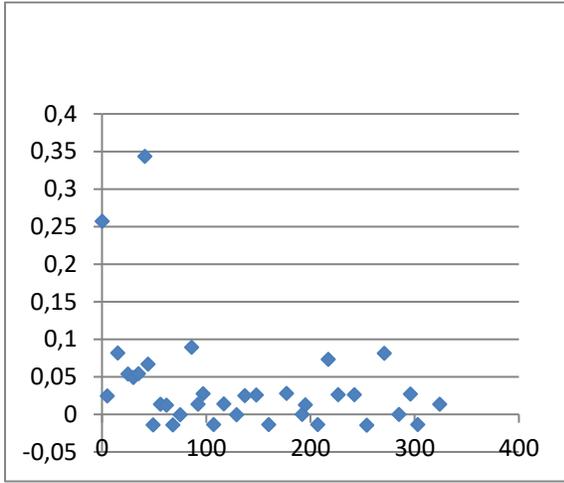
Zn (ng/ml)



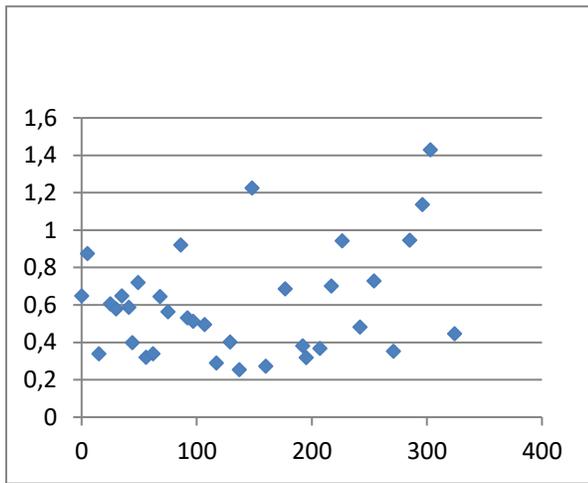
As (ng/ml)



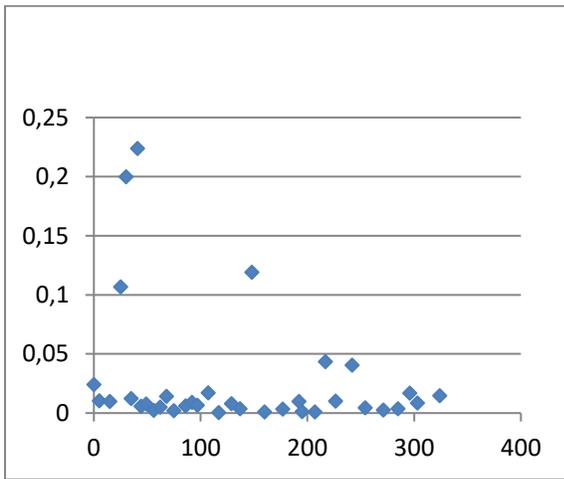
Se (ng/ml)



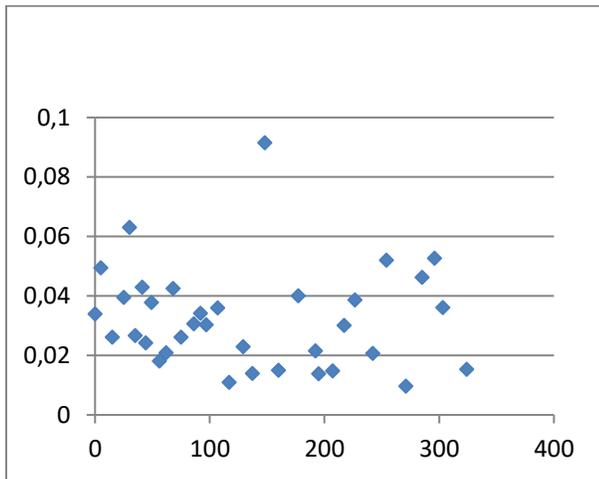
Sr (ng/ml)



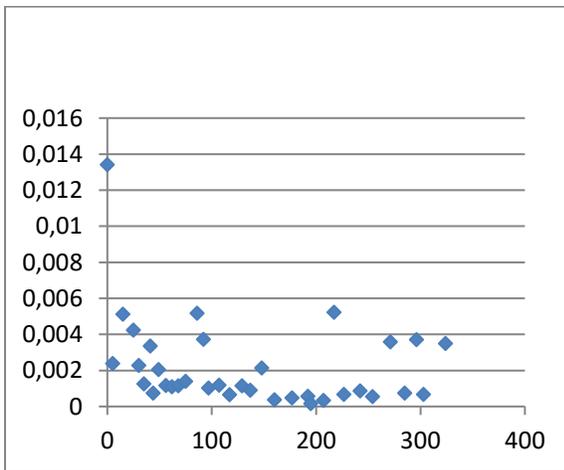
Ag (ng/ml)



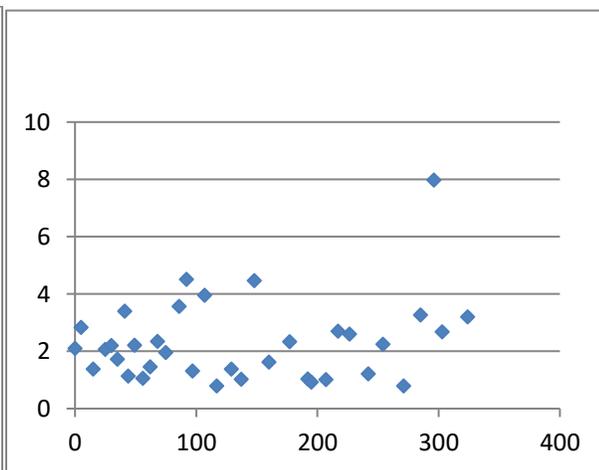
Cd (ng/ml)



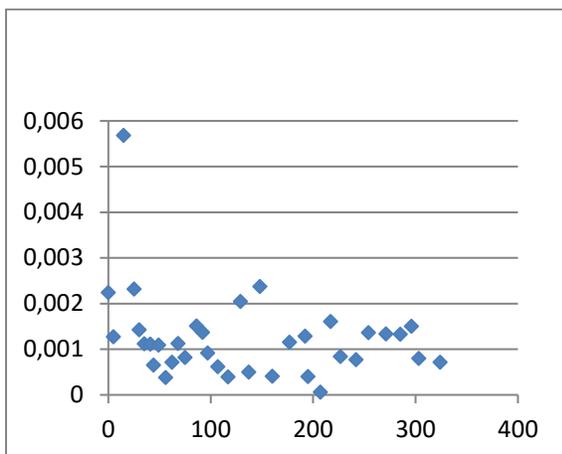
Cs (ng/ml)



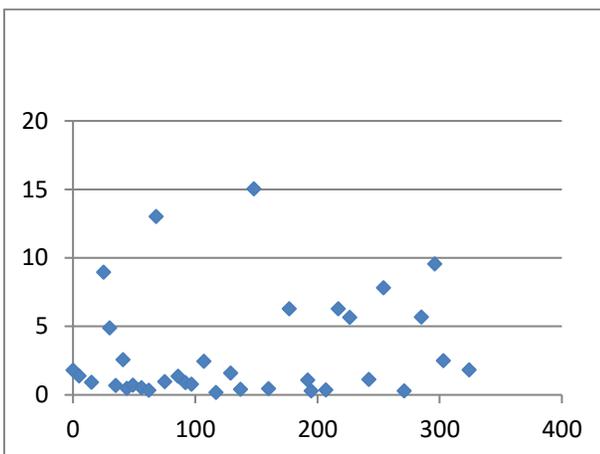
Ba (ng/ml)



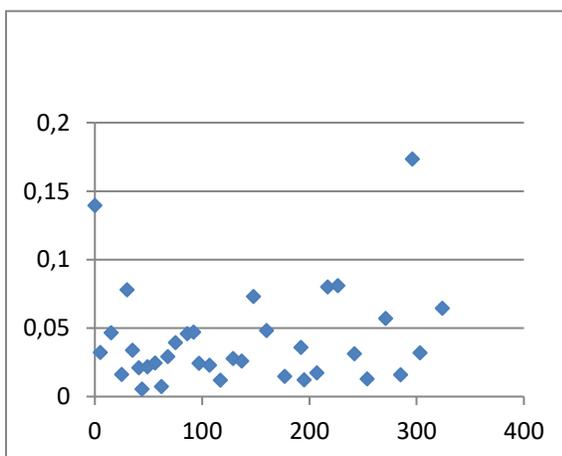
Tl (ng/ml)



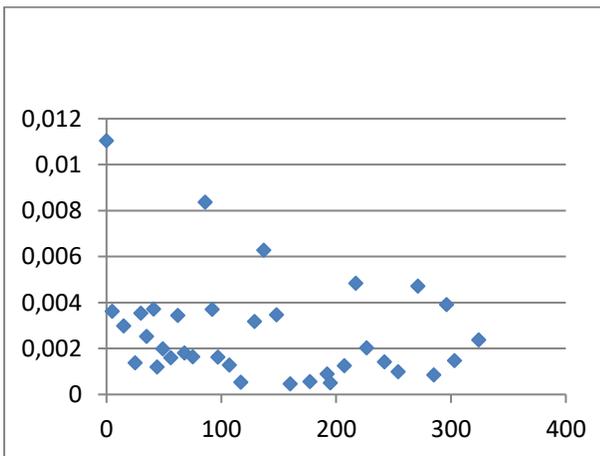
Pb (ng/ml)



Bi (ng/ml)



U (ng/ml)



Sintesi del confronto con la chimica

Dal confronto dei dati riportati qui sopra si rileva come non vi sia una specie chimica che mostri una variazione temporale della concentrazione particolarmente vicina ai parametri misurati dalle polveri con il metodo SPES. Questo comporta che, perlomeno dal punto di vista chimico, non vi siano elementi rilevanti che mostrino la necessità di modificare i modelli di interpretazione delle proprietà delle polveri durante la stagione invernale.

Di seguito si riportano i dati relativi all'apporto di polveri sahariane sul sito di LaThuile, ricavati dal modello DREAM8b del BSC di Barcellona. Si presentano qui di seguito i dati relativi al periodo 1 ottobre 2016 (a) – 20 giugno 2017 (b). Nonostante gli apporti di sahariane siano prevalentemente avvenuti nei periodi estivi, come di consueto, alcuni eventi sono evidenti anche nel periodo considerato. Il periodo scelto è stato ricavato sulla base dei dati meteorologici delle stazioni di LaThuile, isolando il periodo della stagione 2016-2017 durante il quale la temperatura si è mantenuta sostanzialmente sotto lo zero, permettendo la conservazione al suolo dello strato di neve deposta. Si considerano eventi sahariani attendibili quelli per cui le concentrazioni superano i 5 ug/m^3 , per i quali si ha generalmente un riscontro dai depositi al suolo. I valori di concentrazione non sono però attendibili da un punto di vista quantitativo, e vengono qui considerati solo come riferimento temporale durante la stagione.

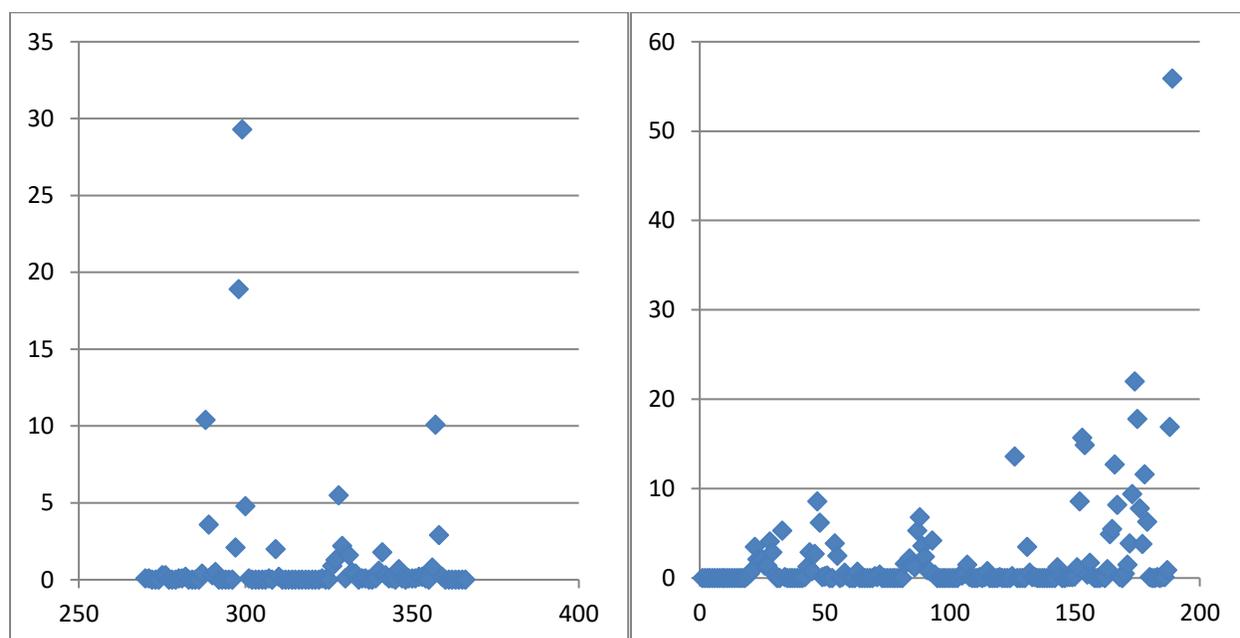


Figura 3: Concentrazione di polveri PM10 in aria secondo il modello indicato, in funzione del giorno giuliano nel 2016 (a) e nel 2017 (b).

Nel 2016 si rilevano eventi attendibili nei periodi intorno ai giorni 300, 330 e 360; nel 2017 nei giorni 25, 50, 85, 150, 170, 180.

Si è quindi proceduto a costruire una relazione che permette di ricavare il giorno giuliano (ordinate) in funzione dello spessore cumulato delle precipitazioni, considerate nevose in tutto il periodo considerato (unità arbitrarie). Il giorno giuliano è calcolato a partire dal 1 gennaio 2016 e mantenuto crescente durante il 2017.

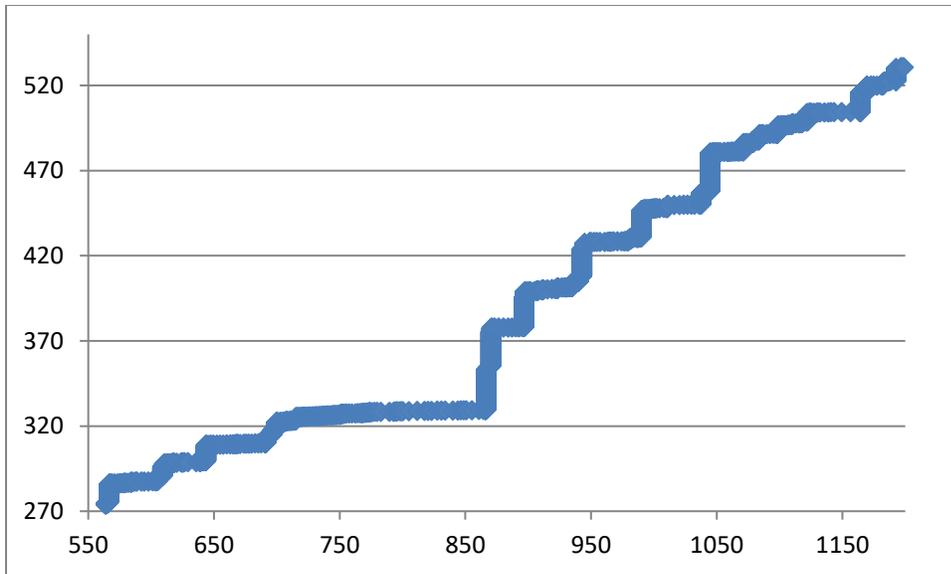


Figura 4: Giorno Giuliano rappresentato in funzione della quantità di precipitazioni cumulate a partire dal 1 gennaio 2016.

Sulla base del grafico precedente è stata trovata la funzione analitica che permette di risalire dalla profondità alla data JD. Il grafico seguente (Figura 5) mostra la concentrazione delle polveri riportata in Fig. 1, con le ascisse convertite in JD secondo l'approccio appena descritto. Questo grafico può venire confrontato direttamente con il grafico di Fig. 3., trovando un buon riscontro tra l'accumulo di polveri al suolo e l'apporto di polveri sahariane in atmosfera. Il valore medio del parametro rho rimane invece piuttosto uniforme.

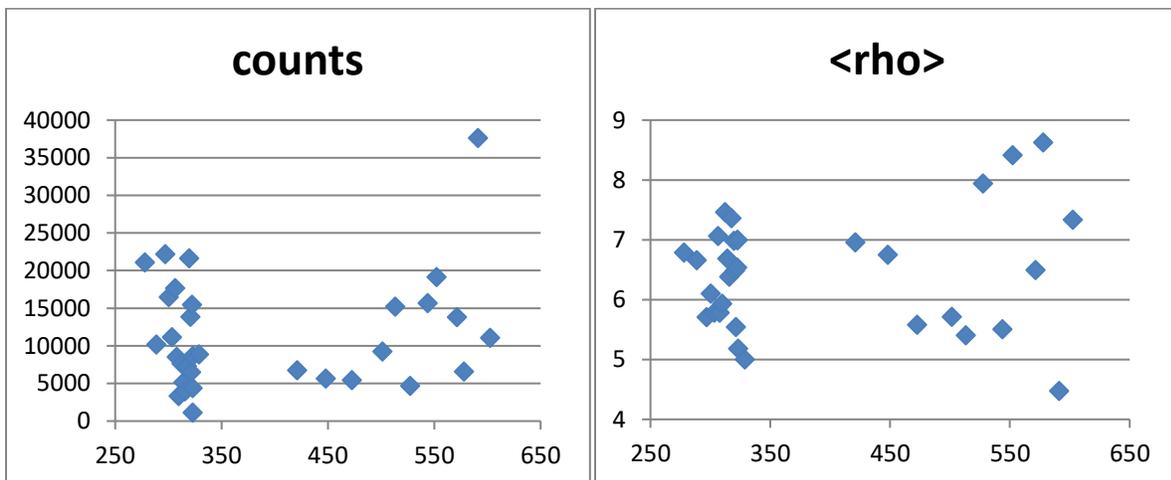


Figura 5: Concentrazione di polveri misurate alla SPES (a sinistra) e valore medio del parametro rho (a destra) in funzione del giorno giuliano ottenuto come descritto nel testo.

7.5 Misure Dirette di aerosol in atmosfera mediante strumentazione SPES

7.4 La rete di gestione dei dati

ARPA dispone di un servizio FTP esposto all'esterno della rete interna, quindi è accessibile da Internet senza restrizioni. Il servizio è usabile tramite interfaccia web o client FTP. L'accesso avviene con username e password. I dati salvati su tale servizio FTP, in seconda battuta, verranno inseriti in un database PostgreSQL esistente tramite uno script schedulato che gira su un server Linux esistente all'interno della rete di ARPA.

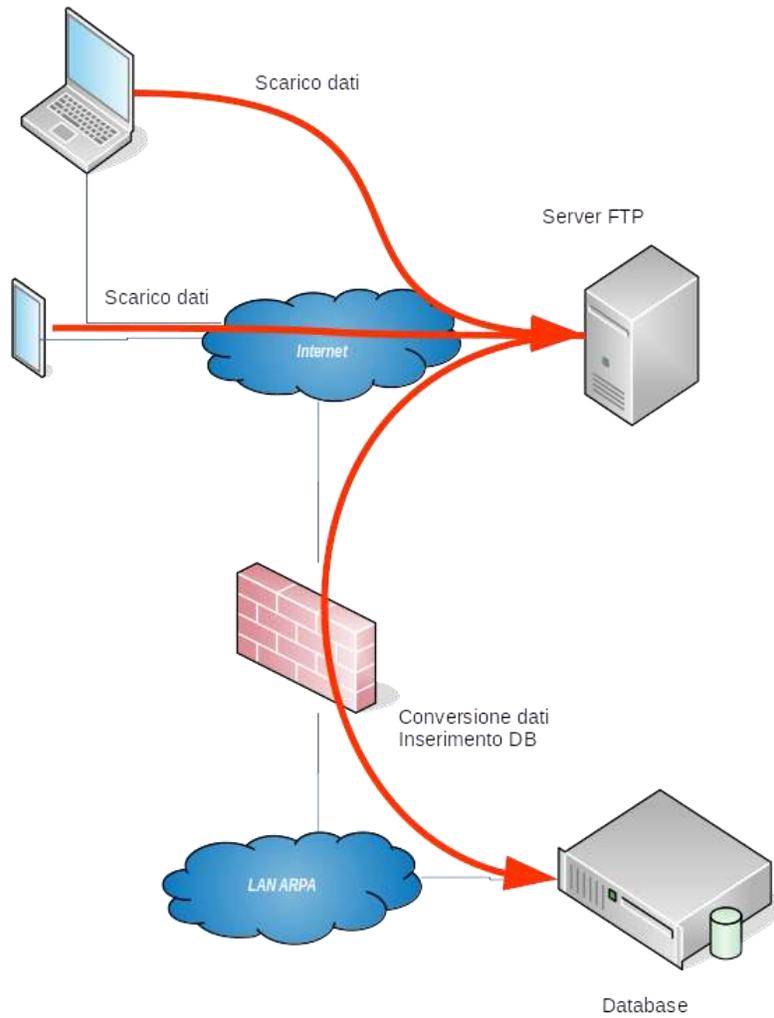


Figura 7.8: Schema della rete di gestione dei dati iprevista per GAIA

8. TRASFERIMENTO TECNOLOGICO

In conclusione, riassumiamo gli obiettivi dei tre progetti operativi che costituiscono il programma di ricerca dell'UdR GAIA.

ARBOL riguarda lo sviluppo di uno strumento per la bolometria multibanda, altamente innovativo in quanto allo stato attuale non esistente sul mercato;

SRS sfrutta sistemi già noti di spettrodiometria solare, dove il contributo in innovazione riguarda il loro utilizzo grazie a una calibrazione di nuova concezione e all'integrazione con il sistema bolometrico multibanda;

DAT infine riguarda lo sviluppo di un sistema che permette gestione e upload dei dati acquisiti da ARBOL e SRS in modalità automatica e self-aligning, così da unire le informazioni provenienti dai vari strumenti in un quadro unitario e user-friendly.

Il prodotto finale, confluenza dei tre progetti operativi, risulta essere un prodotto finalizzato al monitoraggio, allo studio estensivo e alla caratterizzazione dell'aerosol, con modalità innovative e a costi contenuti per il campo.

Da quanto descritto in maniera puntuale nella presente relazione, il lavoro svolto sui tre progetti operativi nei primi 18 mesi di attività dell'UdR GAIA è stato di notevole levatura, sia a livello scientifico che di sviluppo tecnologico, nonostante la necessaria riorganizzazione del lavoro seguita alla concessione del 50% del contributo richiesto. Il grande impegno profuso da tutti i partner nelle attività, anche nei termini concreti e quantificabili del co-finanziamento, dimostra quanto il gruppo di lavoro creda nel progetto di sviluppo dell'UdR GAIA.

I partner sono pienamente consapevoli che il mercato di riferimento per la strumentazione e i procedimenti che si stanno sviluppando sia di nicchia, perché fortemente orientato a enti tecnici del settore come le ARPA, centri di ricerca specializzati, settori tecnici industriali. Tuttavia, il campo applicativo dove i risultati ARBOL, SRS, DAT potranno inserirsi è di grande interesse in tutto il mondo: non vi è zona antropizzata in cui tenere sotto controllo aerosol ed inquinanti non sia di primaria importanza. Perciò riuscire a sviluppare nuove tecnologie altamente robotizzate e a basso costo che permettano di aumentare il grado di risoluzione dello studio degli aerosol, dal punto di vista microscopico delle caratteristiche chimico-fisiche delle particelle a quello macroscopico della copertura spaziale e temporale della loro distribuzione, risulta essere una attività centrale per qualunque territorio.

Nel caso specifico dell'UdR GAIA, trasferire le competenze e i contenuti scientifici di lato livello quali quelle dei partner CINFAI (in particolare l'Università degli Studi di Milano), OAVdA e ARPA ad un'impresa giovane e dinamica come il partner EST rappresenta una sfida importante per l'azienda e un contributo di valore per lo sviluppo del tessuto industriale valdostano.