### POLITECNICO DI TORINO

### SEDE DI TORINO

Corso di Laurea in Elettronica

Tesi di Laurea Magistrale

## Studio dell'impatto dello stress idrico sull'impedenza del fusto della pianta



Relatore prof. Danilo Demarchi Correlatori: prof. Maurizio Martina dott. Paolo Motto Ros dott. Umberto Garlando Studentessa Stefania SCEUSA matricola: s262130

ANNO ACCADEMICO 2019 – 2020

## Sommario

L'industrializzazione, la continua crescita demografica e l'espansione delle aree agricole, per far fronte alla sempre maggiore richiesta di cibo, hanno portato a una sempre maggiore richiesta di acqua. Oggigiorno il 70% delle risorse idriche del pianeta sono utilizzate in campo agricolo per l'irrigazione delle colture, rendendo fondamentale il monitoraggio dello stato di idratazione delle piante per poter stabilire il giusto momento e la giusta quantità di acqua con cui irrigare, al fine di ridurre gli sprechi idrici. L'idea presentata in questa tesi è di porre la pianta di tabacco sotto stress idrico e, studiare la risposta impedenziometrica al variare della frequenza, così da poter utilizzare in futuro questi dati per conoscere la reale condizione idrica della pianta e provvedere solo allora a una corretta irrigazione.

In primo luogo è stato definito il sistema di misura per poter acquisire i dati d'impedenza e ambientali: i primi vengono acquisiti dall'analizzatore di impedenza Agilent 4295A, mediante collegamenti a quattro fili, il tutto gestito da un'interfaccia LabView, e i dati salvati su un file .txt; i secondi salvati su un file formato .csv inviato da una scheda Rasberry Pi Zero W, collegata ai seguenti sensori: umidità e temperatura ambientale (HDC2080; Texas Instruments), luce ambientale(OPT3001; Texas Instruments) e umidità del suolo (Watermark; Irrometer).

Tutti i dati sono stati poi importati e analizzati da uno script Python che li organizza in delle liste per poi generare dei grafici temporali relativi ai dati dei sensori in relazione a quelli di impedenza, quest'ultimi riferiti a precise frequenze di stimolo, nel rage 40 Hz- 1 MHz. Vengono inoltre generati dei grafici in cui sono messi a confronto i segnali di modulo e fase acquisiti a diverse frequenze, sia su scala temporale che in frequenza, così da poter modellizzare la struttura elettrica passiva della pianta osservando la risposta a seguito di varie frequenze di stimolo.

Successivamente lo stesso programma procede all'analisi statistica dei dati acquisiti mediante il test di correlazione e di causalità di tipo Granger, questo per poter quantificare la relazione presente tra i dati ambientali e quelli d'impedenza.

I risultati ottenuti sono riguardanti la relazione dell'impedenza con il ciclo giorno-notte e la risposta impedenziometrica della pianta alla carenza e all'eccesso idrico.

Nel primo caso si è osservato che i dati di modulo e fase presentano una periodicità temporale che, in una pianta non sottoposta a stress idrico, evidenzia una correlazione negativa con i dati di luce e temperatura, e una correlazione positiva con quelli di umidità dell'aria; in una pianta sotto stress invece si denota un chiaro cambiamento di comportamento nella fase, con una correlazione opposta a quella osservata nel caso precedente.

Nel secondo caso invece si è osservato un aumento del modulo sia nel caso di eccesso che di carenza idrica, mentre per quanto riguarda la fase, in condizione di carenza idrica si è osservato un comportamento non univoco a seguito di un comune periodo di crescita iniziale; mentre in condizione di eccesso idrico si è evidenziato un comportamento di forte crescita nei primi giorni successivi all'irrigazione, e un conseguente calo fino all'inizio dello smaltimento dell'acqua somministrata. Tutte queste osservazioni sono state avvalorate dai risultati ottenuti dall'analisi statistica di correlazione e causalità di tipo Granger. Tali studi sono inoltre stati ripetuti per diverse frequenze, osservando che: per il modulo più è bassa la frequenza di stimolo più il valore medio e le variazioni, in risposta agli stimoli, sono alti mentre per la fase si è osservato uno sfasamento minimo a bassa frequenza e crescente con l'aumento della frequenza di stimolo.

Visti i positivi risultati ottenuti si è provveduto successivamente alla messa in atto e alla validazione di un sistema portatile e a basso costo di misura d'impedenza a quattro terminali, sfruttando la scheda dell'Analog Device ADuCM350, volto ad acquisire i dati senza dover adoperare ingombranti e costosi strumenti da banco.

Si può dunque concludere che si è osservata una marcata relazione tra l'impedenza e il contenuto idrico della pianta. I risultati rappresentano però solo un primo passo nella ricerca in questo campo, servono infatti più acquisizioni per poter creare un modello affidabile di previsione dello stato idrico della pianta, e necessitano ancor più osservazioni e piante analizzate per poter generalizzare le previsioni ad un'intera categoria di piante. Da ciò che si è osservato, dai positivi risultati statistici ottenuti e dagli altri studi riportati in letteratura a riguardo dell'utilizzo della spettroscopia sugli esseri viventi vegetali si può però dire che il monitoraggio dell'impedenza è un ottimo metodo per ottenere informazioni sulla salute della pianta perché diretto, non invasivo e utilizzabile per molte indagini diverse, tra cui: l'individuazione tempestiva di malattie, l'identificazione di carenze di specifici nutrienti nel terreno e la quantificazione della corretta dose di acqua da utilizzare nell'irrigazione.

## Ringraziamenti

Con questa tesi si segna la fine di una fase della mia vita, quella da studentessa. Sono stati anni di duro lavoro e sacrificio, prima di ogni altro ringrazio Dio per la grande forza che mi ha dato nell'affrontare ogni sfida, ho sentito la sua grande benedizione in ogni persona che ha messo al mio fianco in questo cammino e in tutti i grandi traguardi che mi ha permesso di raggiungere. Un grazie speciale va alla mia famiglia, che non ha mai smesso di credere in me e che non mi ha mai fatto mancare l'incoraggiamento e la speranza. In particolare ringrazio mia mamma e mia nonna Maria per la presenza, l'interesse, il sostegno e la grande forza che mi hanno trasmesso; ringrazio anche mio papà, mio nonno Paolo, la mia cara nonna Elena, mia zia Lalla, mio fratello, mia cugina e tutto il resto della mia amata e preziosa famiglia. Un grande ringraziamento va anche al mio amato Stefano, per aver combattuto al mio fianco questa battaglia, per tutto l'amore, il tempo, l'affetto, la gioia e il divertimento che abbiamo condiviso, in ogni situazione bella e brutta. Ringrazio Pietro e Alessia per la comunione, la compagnia e il sostegno che non mi hanno mai fatto mancare, ringrazio la mia amata chiesa per le preghiere, la forza e l'incoraggiamento che mi hanno dato. Ringrazio poi ogni amico e ogni collega che ha condiviso con me un pezzo di questo percorso, li ringrazio perché insieme, questi anni sono stati più leggeri, intensi e ricchi di tanti bei momenti. Ringrazio gli amici della triennale per avermi accompagnata negli anni più delicati del percorso universitario, grazie per il divertimento, il sostegno e la grande compagnia che siete stati per me. Ringrazio tutte quelle persone che direttamente o indirettamente mi hanno spronata a fare il mio massimo e a spendermi per gli altri, tra queste persone un grazie speciale va a Barbara e Dadda per il ruolo importante che hanno avuto al nascere del percorso di crescita che mi ha portato fin qui oggi. Voglio inoltre ringraziare in modo particolare il mio relatore Danilo Demarchi che mi ha permesso di essere parte di questo studio di ricerca, grazie per lo sprono, la fiducia e la gestione attenta che ha avuto per il progetto; ringrazio inoltre i miei correlatori Umberto Garlando, Paolo Motto Ros e Maurizio Martina per avermi aiutata, supportata e guidata con pazienza in questo lavoro di ricerca. Un grazie inoltre va a tutti quei professori che hanno dato il massimo per la nostra istruzione, come uomini e donne e come futuri ingegneri. Un grazie speciale va a Maurizio Zamboni, Mariagrazia Graziano e Gianluca Piccinini per la dedizione che mettono nell'insegnamento e perché sono stati per me delle grandi guide e dei grandi esempi. Grazie a tutti quelli che ho nominato e anche a quelli che non ho citato ma che sono nel mio cuore, questo traguardo è stato possibile anche grazie a voi e vi sono grata per essermi stata affianco in tutti questi anni.

Torino, Italia, 9 dicembre 2020

# Indice

El	enco delle tabelle	9
El	enco delle figure	10
1	Introduzione         1.1       Il progetto         1.2       Perché la scelta della pianta di Tabacco?         1.2.1       Canali conduttivi delle piante vascolari	15 15 16 16
2	Stato dell'arte2.1Lo studio dell'impedenza interna delle piante, risultati e vantaggi2.2Lo studio attraverso lo sfruttamento di sensori	19 19 20
3	Sistema di misura         3.1       Acquisizione dati ambientali         3.2       Misura d'impedenza con strumentazione da banco         3.2.1       Interfaccia Labview	21 21 23 24
4	Elaborazione dei dati ambientali e di impedenza della pianta	25
5	Approfondimento sui metodi utilizzati per l'analisi statistica dei dati acquisiti         5.1       Test di correlazione         5.2       Test di causalità di Granger	39 39 40
Ι	Andamento di modulo e fase in risposta agli stimoli esterni	45
6	Introduzione	47
7	Comportamento dell'impedenza in relazione ai valori ambientali misurati	49
8	<ul> <li>Reazione dell'impedenza al ciclo giorno-notte</li> <li>8.1 Risultati statistici del test di correlazione e di causalità</li></ul>	53 57 62

9	Ris	posta impedenziometrica della pianta allo stress idrico	65	
	9.1	Reazione a carenza idrica	65	
		9.1.1 Risultati statistici del test di correlazione e di causalità	73	
		9.1.2 Confronto della risposta impedenziometrica misurata a varie frequen-		
		ze di stimolo	76	
	9.2	Reazione a eccesso idrico	79	
10	Con	nclusioni	81	
п	N	uovo sistema di misura dell'impedenza della pianta	83	
11	Mis	ura dell'impedenza della pianta con la scheda ADuCM350	85	
	11.1	Specifiche del sistema di misura progettato	85	
	11.2	Descrizione della scheda ADuCM350	85	
	11.3	Definizione e programmazione del sistema di misura	90	
		11.3.1 Misura d'impedenza a 4 terminali	91	
		11.3.2 Temporizzazione dell'acquisizione	104	
		11.3.3 Trasmissione dei dati acquisiti tramite protocollo UART	106	
		11.3.4 Diagramma di flusso completo del programma	107	
	11.4	Script Python per il salvataggio dei dati seriali acquisiti	109	
	11.5	Collegamento della scheda, caricamento del programma e impostazioni	111	
	11.6	Validazione del sistema di misura	115	
12	Con	lusioni	121	
Bi	Bibliografia 123			

# Elenco delle tabelle

# Elenco delle figure

3.1	Schema a blocchi del modulo di interfaccia utile a convertire il segnale di resistenza misurato dal sensore di umidità del substrato in un segnale digitale	22
3.2	Schema a blocchi del sistema di acquisizione dei dati ambientali	22
3.3	Analizzatore d'impedenza di precisione Agilent 4294A	23
3.4	Schema di principio acquisizione dati impedenzimetro	23
3.5	Interfaccia grafica LabView per controllare il sistema di misura dei dati di impedenza e per il salvataggio e il monitoraggio dei valori acquisiti	24
4.1	Diagramma di flusso del programma Python di elaborazione e analisi dati .	26
4.2	Grafico dei dati ambientali, prodotto dalla funzione plot_sensors()	28
4.3	Grafico in frequenza del modulo e della fase dell'impedenza al passare dei giorni, prodotto dalla funzione plot_module_and_phase()	29
4.4	Risultati ottenuti dalla funzione adfuller_test(), per sapere se un segnale è stazionario.	30
4.5	Risultati dell'adfuller test ottenuti per ogni segnale di impedenza misurato a una data frequenza di stimolo	31
4.6	$Matrice \ di \ Granger \ causalit \ prodotta \ dalla \ funzione \ Granger \ causalit \ y \ test()$	32
4.7	Matrice di correlazione prodotta dalla funzione correlation_test() $\ldots$ .	33
4.8	Grafico che mostra i dati ambientali e di impedenza, prodotto dalla funzione Plot_sensors_and_impedance()	34
4.9	Grafico che mostra i segnali di luce, umidità del terreno e di impedenza, prodotto dalla funzione Plot_moisture_light_and_impedance()	35
4.10	Grafico che mette a confronto i segnali di impedenza misurati con varie fre- quenze di stimolo, prodotto dalla funzione Plot_moisture_light_and_impedan	ce() 37
5.1	$Matrice \ di \ correlazione \ ottenuta \ grazie \ alla \ funzione \ Python \ . \ corr(method=Pear)$	son) 40
5.2	Matrice di Granger che riporta la minima probabilità che la serie corrispon- dente alla colonna non Granger-causi la serie associata alla riga corrispettiva.	43
6.1	Piante di tabacco utilizzate nell'esperimento, da sinistra verso destra si ha rispettivamente: <i>pianta1, pianta2</i> e <i>pianta3.</i>	48
7.1	Grafico che mostra le due componenti che formano i segnali di modulo e fase: quella che definisce il trend e quella che aggiunge il contributo ripetitivo	50
8.1	Grafico che mostra la forte relazione presente tra luminosità, temperatura e umidità dell'aria.	54

8.2	Grafico che mostra l'influenza che luminosità, temperatura e umidità del- l'aria hanno sul modulo e sulla fase della pianta. Ad esempio è riportata	
	<i>Pianta2</i> misurata alla frequenza di stimolo di 10.145 kHz, nel periodo 5-11 Novembre.	55
8.3	Matrice di correlazione che mostra la relazione di: luminosità, temperatura e umidità dell'aria con l'impedenza di <i>Pianta2</i> misurata a 10.145 kHz, nel periodo 5-11 Novembre.	57
8.4	Grafico che mostra l'influenza che luminosità, temperatura e umidità del- l'aria hanno sul modulo e sulla fase della pianta. Il grafico riporta la sot- tosezione temporale 5-7 Novembre di <i>Pianta2</i> , misurata alla frequenza di stimolo di 10.145 kHz	58
8.5	Matrice di correlazione che mostra la relazione di: luminosità, temperatura e umidità dell'aria con l'impedenza di <i>Pianta2</i> misurata a 10.145 kHz, nel periodo 5-7 Novembre.	59
8.6	Grafico che mostra l'influenza che luminosità, temperatura e umidità del- l'aria hanno sul modulo e sulla fase della pianta. Il grafico riporta la sot- tosezione temporale 8-11 Novembre di <i>Pianta2</i> , misurata alla frequenza di stimolo di 10.145 kHz.	60
8.7	Matrice di correlazione che mostra la relazione di: luminosità, temperatura e umidità dell'aria con l'impedenza di <i>Pianta2</i> misurata a 10.145 kHz, nel periodo 8-11 Novembre.	61
8.8	Matrice di Grager che mostra le probabilità che: luminosità, temperatura e umidità dell'aria non Granger-causino le variazioni nel modulo e nella fase di <i>Pianta2</i> misurato a 10.145 kHz, nel periodo 5-11 Novembre.	62
8.9	Grafico che mette a confronto, su scala temporale, il modulo e la fase misu- rati a varie frequenze di stimolo, con focus sulle variazioni indotte dal ciclo giorno-notte. La pianta analizzata è <i>Pianta2</i> nel periodo di tempo 5-11 Novembre.	63
9.1	Grafico che mostra la risposta del modulo e della fase della pianta allo stress idrico e al successivo evento di irrigazione. Il grafico si riferisce a <i>pianta3</i> nel periodo 8-27 ottobre e a una frequenza di stimolo per la misura di impedenza pari a 10.145 kHz.	66
9.2	Foto che mostra lo stato di buona salute di <i>pianta3</i> all'inizio dell'esperimen- to, l'8 ottobre.	67
9.3	Foto che mostra lo stato di salute di <i>pianta3</i> il 15 ottobre, dopo 7 giorni dall'irrigazione dell'8 ottobre.	68
9.4	Foto che mostra lo stato di stress idrico di <i>pianta3</i> il 19 ottobre, dopo 11 giorni dall'irrigazione dell'8 ottobre.	69
9.5	Foto che mostra la ripresa di <i>pianta3</i> già all'indomani dell'evento di irriga- zione del 19 ottobre.	70
9.6	Grafico che conferma la risposta del modulo allo stress da carenza idrica e che mostra l'altro comportamento della fase osservato in precedenza all'evento di irrigazione, cioè un andamento sempre crescente. Il grafico si riferisce a <i>pianta1</i> nel periodo dal 28 ottobre al 16 novembre, con frequenza di stimolo per la misura di impedenza pari a 10.145 kHz.	72

9.7	Risultati del test di correlazione nell'intorno dell'evento di irrigazione del 19 ottobre di <i>pianta3</i> . Il test è applicato ai segnali di impedenza misurati
	grazie a un segnale di stimolo di frequenza pari a 10.145 kHz.
9.8	Risultati del test di causalità di tipo Granger nell'intorno dell'evento di irri-
	gazione del 19 ottobre di <i>pianta3</i> . Il test è applicato ai segnali di impedenza
	misurati grazie a un segnale di stimolo di frequenza pari a 10.145 kHz.
9.9	Risultati del test di correlazione nell'intorno dell'evento di irrigazione del 11
	novembre di <i>pianta1</i> . Il test è applicato ai segnali di impedenza misurati
	grazie a un segnale di stimolo di frequenza pari a 10.145 kHz.
9.10	Risultati del test di causalità di tipo Granger nell'intorno dell'evento di
	irrigazione del 11 novembre di <i>pianta1</i> . Il test è applicato ai segnali di
	impedenza misurati grazie a un segnale di stimolo di frequenza pari a $10.145$
	kHz
9.11	Confronto di modulo e fase misurati a varie frequenze, con focus sulla rispo-
	sta a condizioni di stress da carenza idrica. La pianta analizzata è $\mathit{Pianta3}$
	nel periodo di tempo 8-27 ottobre
9.12	Confronto di modulo e fase misurati a varie frequenze, con focus sulla rispo-
	sta a condizioni di stress da carenza idrica. La pianta analizzata è <i>Pianta1</i>
	nel periodo di tempo 28 ottobre - 16 novembre
9.13	L'acqua nel sottovaso della pianta di sinistra è prova dell'eccessiva irrigazione
	di <i>pianta2</i>
9.14	Grafico che mostra la risposta del modulo e della fase all'irrigazione. Sulla
	sinistra si trova <i>pianta3</i> che è stata correttamente irrigata, mentre sulla
	destra si trova <i>pianta</i> <sup>2</sup> che è stata eccessivamente irrigata. I valori di im-
	pedenza sono stati misurati a seguito di un segnale di stimolo di frequenza
11.1	Diagramma a blocchi funzionale della scheda ADuCM350
11.2	DSP accelerators del blocco AFE
11.3	Scheda ADuCM350
11.4	Scheda di espansione EV-ADuCM350 BIO3Z
11.5	Scheda EV-ADuCM350 BIO3Z, espansione di input/output
11.6	Scheda di espansione USB-SW/UART-EMUZ
11.7	Schema a blocchi dell'Analog Front End (AFE)
11.8	Stadio di stimolo dell'Analog Front End (AFE)
11.9	Schema a blocchi del loop di stimolo del blocco AFE, nella configurazione
	di misura a 4 fili
11.1	OStadio di misura dell'Analog Front End (AFE)
11.1	1 Misura errore di guadagno amplificatore a transimpedenza, diagramma sem-
	plificato
11.1	2Misura errore di offset amplificatore a transimpedenza, diagramma sempli-
	ficato
11.1	3Matrice degli switch nell'Analog Front End (AFE)
$11.1_{-}$	4Matrice degli switch per la misurazione dell'impedenza
11.1	5Schema a blocchi del modulo di Analog Front End(AFE) e della sua comu-
	nicazionen con il processore

11.16Diagramma di flusso della programmazione della scheda ADuCM350 con	
focus sulla misura d'impedenza	101
11.17Diagramma a blocchi del timer ad uso generale	105
11.18Diagramma di flusso della programmazione della scheda ADuCM350.	
Completa di: misura d'impedenza, temporizzazione e trasmissione attraver-	
so UART.	108
11.19Diagramma di flusso dello script Python per il salvataggio dei dati	109
11.20Collegamenti della scheda ADuCM350 per la misura d'impedenza	111
11.21Posizione pin AFE sulla scheda di espansione EV-ADuCM350 BIO3Z	112
11.22Collegamenti tra scheda EV-ADuCM350 BIO3Z e impedenza sotto misura	112
11.23Impostazione che permettere la comunicazione diretta tra scheda ADuCM350	
e computer	113
11.24Configurazione della porta virtuale del computer per la comunicazione se-	
riale tramite UART	114
11.25 Schemi dei circuiti misurati per la validazione della scheda ADu CM350	115
11.26 Errore della scheda ADuCM350 sulla misura di una resistenza d a $1.2K\Omega$ .	116
11.27 Errore della scheda ADuCM350 sulla misura di una resistenza d a $1.2K\Omega$ in	
parallelo a un condensatore da 2.2 nF	117
11.28 Errore della scheda ADuCM350 sulla misura di una resistenza d a $1.2K\Omega$ in	
serie a un condensatore da 47 nF	118

# Capitolo 1 Introduzione

Le piante sono esseri viventi complessi e il loro modo di comunicare è ancora in gran parte sconosciuto al mondo scientifico; esse attraverso dei canali sono in grado di trasportare le sostanze nutritive e i segnali utili ai processi fondamentali come ad esempio una corretta fotosintesi e l'apertura e la chiusura di foglie o fiori.

Le domande che ci siamo posto sono dunque state: si posso utilizzare questi canali di comunicazione, già presenti, per trasportare un segnale elettrico? Misurando e monitorando le variazioni di impedenza del fusto si possono inoltre avere informazioni utili riguardanti il livello di idratazione della pianta o la presenza di malattie o parassiti? Si possono individuare situazioni di forte stress causate da eventi atmosferici o da eventi di irrigazione scorretti come l'uso di eccessiva acqua?

La misura di impedenza è una misura interna alla pianta e quindi sicuramente varia in base alla salute e all'evoluzione di essa, le domande quindi diventano: in che modo varia l'impedenza in relazione ai bisogni e alle condizioni di malessere della pianta? Possiamo noi, una volta compreso l'andamento dell'impedenza, in relazione agli stimoli e al suo ciclo naturale, accorgerci tempestivamente di una situazione di stress per risolverla in modo mirato e consapevole? Oppure ancora: possiamo ottimizzare l'utilizzo di acqua impiegata per l'irrigazione, osservando la risposta a irrigazioni più o meno eccessive?

Queste sono tutte domande su cui fino ad oggi la scienza non si è molto focalizzata, concentrando gli sforzi invece in ambito biomedico, per monitorare la salute dell'essere umano. Si possono però utilizzare metodi di misura simili anche con gli esseri viventi vegetali per creare delle condizioni il più possibile idonee per la corretta e salutare crescita della pianta. Queste condizioni ottimali consistono: in una corretta quantità di acqua nell'irrigazione, nell'irrigare nel miglior momento, quindi prima dello stress idrico ma dopo la richiesta di acqua da parte della pianta, e nel identificare situazioni di malessere, più o meno visibili ad occhio nudo, in modo tempestivo, così da poter porre rimedio.

### 1.1 Il progetto

Il progetto a lungo termine ha due fronti, uno è quello di utilizzare i canali già presenti nella pianta per trasmettere segnali elettrici e l'altro è utilizzare i dati di impedenza misurati nel fusto della pianta per ottenere informazioni utili alla coltivazione della pianta. I due progetti in futuro potrebbero fondersi; se si è infatti in grado di trasmettere segnali elettrici attraverso i canali della pianta si può ottenere il valore di impedenza, questo misurando l'attenuazione e lo sfasamento del segnale elettrico ricevuto, noto il segnale trasmesso.

Il mio obbiettivo nel progetto è stato quello di analizzare l'andamento del modulo e della fase in relazione allo stato di salute della pianta, monitorato grazie a una webcam, e ai dati ambientali acquisiti dai sensori, quali: luminosità, temperatura, umidità dell'aria e umidità del suolo per andare a capire quali fossero le relazioni presenti. Mi sono poi soffermata sulle variazioni osservate sul modulo e sulla fase in risposta: al ciclo giorno-notte che mostra la reazione della pianta al picco di calore, allo stress da carenza idrica della pianta e alla risposta a una idonea o eccessiva irrigazione. Tutte queste analisi poi sono state confrontate per impedenze misurate a varie frequenze di stimolo, nel rage 40Hz - 1MHz. Tutta questo primo studio condotto a livello visivo e stato poi analizzato dal punto di vista statistico, andando a studiare la correlazione e la Granger causalità tra i valori di modulo e fase e gli altri parametri.

Mi sono infine occupata anche della programmazione di una scheda elettronica, chiamata ADuCM350, per la misura dell'impedenza, contribuendo così a mettere le basi per un sistema di misura dell'impedenza portatile ed economico.

### 1.2 Perché la scelta della pianta di Tabacco?

La pianta di tabacco è stata selezionata per il monitoraggio e la trasmissione dei segnali elettrici perché appartiene all'insieme delle pianta vascolari. Le piante vascolari, anche chiamate tracheofite, sono definite così per la presenza al loro interno di strutture che conducono i fluidi: lo xilema e il floema. Questi canali conduttivi, già presenti nella pianta, sono stati la ragione della scelta della pianta di tabacco, infatti l'idea è stata quella di provare ad utilizzare il sistema di circolazione della pianta per far viaggiare i segnali elettrici trasmessi.

#### 1.2.1 Canali conduttivi delle piante vascolari

Le piante vascolari sono composte da un sistema circolatorio per il trasporto della linfa grezza ed elaborata: attraverso lo xilema e il floema.

Lo xilema [1] trasporta i sali e l'acqua assorbiti a livello radicale verso le foglie, per permettere la reazione della fotositesi clorofilliana. La risalita della linfa grezza è in parte generata dal fenomeno della capillarità, per cui l'acqua tende a risalire in tubi di piccolo diametro, come gli elementi xilematici, e in parte è generata dalla pressione radicale, grazie a cui l'acqua e i sali continuamente assorbiti dalle radici forniscono una pressione che dal basso spinge l'acqua nello xilema verso l'alto. Tuttavia per rendere possibili alte risalite, come nel caso delle sequoie in cui la linfa grezza deve percorrere 100 m, è necessaria un'altra spiegazione, fornita dalla teoria coesione-tensione. A livello delle foglie sono infatti presenti delle aperture nell'epidermide, chiamate stomi, tramite cui l'acqua, irraggiata dal sole, fuoriesce per evaporazione (processo chiamato traspirazione). Viene così a crearsi un potenziale idrico minore che richiama acqua dalle zone adiacenti a potenziale idrico maggiore, cioè viene a crearsi una aspirazione di acqua che si ripercuote dal parenchima fogliare alle nervature xilematiche della foglia e infine allo xilema del fusto in continuità con le nervature. L'aspirazione è perciò la principale forza che fa risalire l'acqua. Lo xilema consiste di tre tipi di cellule: tracheidi, tracheae e fibre. I tracheidi hanno la parete cellulare lignificata, ciò gli conferisce una consistenza dura e resistente, le trachee sono tracheidi più specializzati e sono organizzati in forma tubolare, essi creano i vasi che costituiscono lo xilema e permettono il trasporto della linfa grezza, e infine, le fibre sono formazioni spesse, con pareti lignificate, e sono responsabili di fornire ulteriore supporto alla pianta. Negli alberi, per esempio, la serie di anelli concentrici che si osservano quando viene tagliato un tronco sono resti di antichi tessuti xilematici, essi infatti ogni anno muoiono e formano un nuovo xilema, conforme alla crescita della pianta. Questa è la ragione per cui ogni anello rappresenta circa un anno di vita di un albero.

Il floema [2] invece è un complesso di tessuti viventi con la funzione di: trasportare la linfa raffinata, di riserva energetica e sostegno. La linfa raffinata è una soluzione a base d'acqua, ricca di zuccheri provenienti dalla fotosintesi. La conduzione è affidata al tessuto cribroso che trasferisce la linfa zuccherina dall'area di produzione, come ad esempio la foglia matura, ad una regione che richiede gli zuccheri per la propria crescita come: radici, semi e frutti o ad una zona di accumulo, come avviene per esempio nei tuberi, nella radice della barbabietola o nel fusto della canna da zucchero. Tale processo di trasporto è detto traslocazione. Negli alberi, il floema è lo strato più interno della corteccia, ed è proprio da qui che deriva il nome, che in greco significa corteccia. Il floema è composto da un'insieme di cellule connesse grazie al citoplasma.

# Capitolo 2 Stato dell'arte

Oggigiorno l'avanzamento tecnologico ha portato alla crescita della ricerca anche in campo agricolo. Per far fronte infatti alla sempre maggiore necessità di acqua, alla continua crescita demografica mondiale e alla sempre maggiore richiesta di produzione alimentare, molti scienziati hanno già intrapreso vari studi per ottimizzare le preziose risorse in questo campo. Per fare ciò due sono i principali metodi usati: lo studio dell'impedenza e l'utilizzo di avanzati sensori.

### 2.1 Lo studio dell'impedenza interna delle piante, risultati e vantaggi

Come studiato da [10] la pianta è assimilabile a un sistema elettrico passivo che ad un preciso stimolo elettrico da una particolare risposta, che varia in base alla frequenza del segnale di stimolo e, ancora più importante, che varia in relazione allo stato fisiologico della pianta. Sfruttando questa modellizzazione e i dati di impedenza raccolti è possibile prevedere e studiare in modo molto accurato lo stato fisiologico della pianta, ricavando risultati prima completamente ignoti.

Un esempio sono gli studi [11] e [12]: il primo gli indaga gli effetti dell'anossia da eccesso idrico e lo stress da cadmio sullo spettro elettrico d'impedenza, riscontrando un aumento della resistenza dipendente dalla concentrazione di acqua; il secondo ha analizzato gli effetti della carenza di acqua tramite lo studio dell'evapotraspirazione, riscontrando un netto collegamento tra la resistenza misurata e la quantità di acqua presente nella pianta, in particolare ha evidenziato un aumento di impedenza quando la pianta era sottoposta a condizioni di carenza idrica.

A questi risultati si aggiungono gli studi [13] e [14] che hanno rispettivamente sfruttato lo studio dello spettro di impedenza, il primo per rilevare lo stress radicale causato da: siccità, cadmio, disturbi alcalini e competizione da erbe infestanti; e il secondo per l'identificazione, entro poche ore, di infezioni causate da colonie di funghi presenti nelle radici senza dover andare a operare in maniera invasiva sulla pianta. Oltre queste ricerche sullo stato di salute della pianta, altri, come [15] e [16], hanno sfruttato lo studio dello spettro d'impedenza con ottimi risultati per la valutazione della concentrazione di fosforo e potassio nelle piante di pomodoro, nutrienti fondamentali per la corretta crescita della pianta.

### 2.2 Lo studio attraverso lo sfruttamento di sensori

Molti altri studi hanno sfruttato invece altre metodologie per acquisire dati utili a definire lo stato di salute della pianta e predirre in modo più accurato bisogni e malattie. Tra questi abbiamo: [17] e [18], che utilizzando tecniche di imaging applicate a fotografie di foglie, riuscendo ad effettuare una classificazione delle malattie con una precisione superiore al 90%; [19], che utilizzando più telecamere a diverso spettro di luce hanno valutato lo stato di salute della pianta sfruttando l'indice differenziale vegetativo (NDVI), secondo cui foglie con alto contenuto di clorofilla assorbono la luce visibile e riflettono la frequenza infrarossa, e al contrario una pianta malsana assorbe le frequenze infrarosse e riflette la parte della luce visibile([20]); a loro si aggiungono ancora [21] e [22], che hanno usato dei sensori volti a misurare la quantità del fitormone volatile Jasmonato di metile ([23],[24],[25]), un composto organico prodotto da molte piante da frutto per proteggersi da insetti erbivori.

Abbiamo potuto vedere come l'innovazione in campo agricolo è molto attiva, e considerando il vasto mondo che questo ramo della ricerca sta esplorando, diventa di vitale importanza fruttare in modo completo le potenzialità delle ricerche. Ecco perché, come anche sostenuto da [26] e [27] è molto più produttivo sfruttare i sensori ambientali in sinergia ai dati di impedenza acquisiti, così da avere un quadro più completo dello stato della pianta e poter prevedere in modo accurato bisogni e malattie della pianta prima della loro manifestazione visibile.

### Capitolo 3

## Sistema di misura

### 3.1 Acquisizione dati ambientali

Per ogni pianta in esame sono presenti quattro sensori atti a monitorare i dati ambientali, necessari successivamente per poter indagare una relazione con i dati di impedenza. I sensori utilizzati sono:

- Sensore di umidità e temperatura ambientale (HDC2080; Texas Instruments [3]).
- Sensore di luce ambientale (OPT3001; Texas Instruments [4]).
- Sensore di umidità del substrato terroso (Watermark; Irrometer[5]).

I primi due sensori sopra elencati restituiscono i dati automaticamente in formato digitale. Il terzo sensore invece restituisce in uscita un'impedenza e necessita quindi di un piccolo circuito di interfaccia, mostrato nella figura sottostante 3.1, che permetta la conversione del segnale di impedenza del sensore in un segnale digitale.

Tale circuito, mostrato nella figura sotto 3.1, mediante il pin *Out* applica una tensione dipendente dall'impedenza incognita su un condensatore  $C_{timing}$ , che al raggiungimento della soglia di threshold, impostata nel timer LMC555, fa cambiare livello al segnale Discharge definendo in uscita un segnale ad onda quadra. Questo sarà a frequenza maggiore quanto più rapida sarà la caria e scarica del condensatore. Il circuito di interfaccia in esame presenta inoltre due condensatori in serie ai segnali del sensore volti a isolarlo da eventuali tensioni che potrebbero ossidare gli elettrodi di misura.



Figura 3.1. Schema a blocchi del modulo di interfaccia utile a convertire il segnale di resistenza misurato dal sensore di umidità del substrato in un segnale digitale

Questi sensori sono stati successivamente per comodità integrati su una piccola scheda elettronica che si interfaccia tramite comunicazione  $I^2C$  con un modulo Raspberry Pi (Modello Zero W [6]) che salva i dati in memoria, su un file .csv, e li invia tramite Wifi al computer dove sarà poi possibile usufruirne per l'analisi in relazione ai dati di impedenza. A seguire è mostrato lo schema di principio dei collegamenti e del funzionamento del sistema.



Figura 3.2. Schema a blocchi del sistema di acquisizione dei dati ambientali

#### 3.2 Misura d'impedenza con strumentazione da banco

Le misure d'impedenza vengono effettuate attraverso l'Agilent 4294A [7] (3.3), un analizzatore d'impedenza di precisione. Quest'ultimo è connesso a ognuna delle 4 piante grazie a un sistema di multilexing, basato sulle schede "*BNC analog signal multiplexer*"[8]. Queste schede consentono collegamenti a quattro fili, così da separare la maglia voltmetrica da quella amperometrica; i dati acquisiti vengono infine comunicati tramite GPIB(General Purpose Interface Bus) al computer dove, attraverso un'interfaccia LabView, i dati vengono salvati in un file di testo e da cui è possibile monitorare e controllare il sistema. A seguire uno schema di principio mostra tali collegamenti in maniera chiara e intuitiva.



Figura 3.3. Analizzatore d'impedenza di precisione Agilent 4294A



Figura 3.4. Schema di principio acquisizione dati impedenzimetro

#### 3.2.1 Interfaccia Labview

L'interfaccia LabView, che è stata sviluppata interamente in precedenza, permette di visualizzare e salvare i dati di modulo e fase dell'impedenza misurata dallo strumento da banco e di configurare inoltre varie impostazioni di misura, tra cui: la scelta di effettuare una misura singola o una misura continua; il tempo di attesa tra una misura e la consecutiva; il numero di misure effettuate, la frequenza di stimolo di inizio e di fine ecc. . Di seguito possiamo osservare un'immagine che raffigura l'interfaccia completa.



Figura 3.5. Interfaccia grafica LabView per controllare il sistema di misura dei dati di impedenza e per il salvataggio e il monitoraggio dei valori acquisiti

### Capitolo 4

# Elaborazione dei dati ambientali e di impedenza della pianta

Ho poi elaborato i dati raccolti per poter estrapolare relazioni utili tra l'andamento dell'impedenza della pianta e i valori ambientali. L'obbiettivo quindi è stato poter vedere in modo chiaro come varia l'impedenza sapendo: dal sensore di luminosità l'alternarsi del giorno e della notte ma anche delle giornate di sole e delle giornate di cielo nuvolo, dal sensore di umidità l'andamento dell'umidità del terreno e dal sensore di temperatura l'andamento della temperatura. Come ho mostrato nella scorsa sezione l'impedenza della pianta è stata misurata a seguito di varie frequenze di stimolo, comprese tra 40 Hz e 1 MHz, ho quindi poi messo a confronto l'andamento dell'impedenza della pianta in base alla frequenza a cui era stata stimolata.

Per elaborare i dati ho creato un progetto Python composto da: quattro cartelle chiamate "pianta1", "pianta2", "pianta3" e "pianta4" che contengono i files contenenti i valori acquisiti dai sensori associati alle rispettive piante, una cartella chiamata "impedance\_files" che contiene i files contenenti i valori di impedenza acquisiti<sup>1</sup> e i quattro files Python chiamati "main.py", "Configuration.py", "dataLoading.py" e "dataAnalysis.py" che si occupano dell'elaborazione dei dati contenuti nelle cartelle.

Di seguito mostro il diagramma di flusso del programma Python creato.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>A differenza dei files dei sensori i valori di impedenza delle varie piante sono contenuti in un unico file, infatti ogni volta che il sistema acquisisce un nuovo set di misure di impedenza, il multiplexer misura in ordine *pianta1*, *pianta2*, *pianta3* e *pianta4* e salva con lo stesso ordine i dati acquisiti in un unico file.



Elaborazione dei dati ambientali e di impedenza della pianta

Figura 4.1. Diagramma di flusso del programma Python di elaborazione e analisi dati

Come si può vedere ho contrassegnato la maggior parte dei blocchi del diagramma di flusso con uno di questi tre colori: rosa, arancione o verde. Questo l'ho fatto per distinguere, rispettivamente, i blocchi utili alla configurazione del test, i blocchi che producono i vari grafici e i blocchi utilizzati per l'analisi dei dati.

Nel file Configuration.py per ognuna delle funzioni che produce una figura si trova una definizione save\_{nome\_funzione\_che\_produce\_la\_figura} che può essere settata a 1 o a 0. Questo permette di impostare quali immagini si vogliono salvare. Attraverso la funzione configuration(), presente nello stesso file, poi si andranno a creare in modo automatico le varie cartelle in cui andare a salvare le figure, le cartelle verranno create solo nel caso si vogliano salvare le immagini corrispondenti a quello store.

A questo punto si chiamerà la funzione **import\_data()** che creerà due dizionari, *sensors\_values* e *plants*, contenenti tutti i valori dei sensori e di impedenza organizzati per pianta. Basterà quindi indicare di quale pianta si vogliono i valori, per esempio *sensors\_values["pianta1"]* per ottenere i dati esclusivamente di quella pianta.

Bisogna poi inserire i valori di frequenza desiderati nei due vettori target\_freqs e freqs\_for\_impedance\_comparison per indicare rispettivamente quali frequenze sono di interesse per il test, tra le frequenze con cui la pianta è stata stimolata, e quali frequenze si vogliono mettere successivamente a confronto. target\_freqs va definito nel file main.py, mentre freqs\_for\_impedance\_comparison va definito nel file dataLoading.py.

A questo punto l'ambiente è configurato e si può procedere con la definizione e l'avvio del test. Per fare ciò si deve chiamare la funzione start\_tests() e passargli in particolare:

- i valori dei sensori e di impedenza della pianta desiderata per il test. Questo andando a selezionare la pianta di interesse nei due dizionari sensors\_values e plants
- il vettore *target\_freqs* per indicare quali valori di impedenza sono di interesse per le analisi e i grafici
- la data e l'orario di inizio e fine test.

Questa funzione, partendo dai dati di impedenza e dei sensori che gli sono stati passati, creerà un sotto insieme con solo i dati all'interno del periodo di tempo indicato per il test. Passerà quindi questi dati alla funzione **perform\_tests()** insieme, principalmente, al vettore *target\_freqs*.

La funzione **perform\_tests()** eseguirà tutte le funzioni sia del gruppo arancio che del gruppo verde, quindi sia le funzioni di plot che quelle di analisi dei dati.

Innanzitutto all'interno del test verranno graficati i dati dei sensori grazie alla funzione **plot\_sensors()** e i segnali di modulo e fase dell'impedenza al variare della frequenza, grazie alla funzione **plot\_module\_and\_phase()**. Ad entrambe le funzioni inoltre si può passato il valore *step*, esso di default vale 24. Questa variabile indica: per il grafico dei sensori ogni quante ore mettere il "label" e la griglia nell'asse delle x mentre per il grafico.

La seguente immagine mostra un esempio di grafico prodotto dalla funzione **plot\_sensors**().



Figura 4.2. Grafico dei dati ambientali, prodotto dalla funzione plot\_sensors()

Mentre la seguente figura riporta un esempio di grafico generato dalla funzione **plot\_module\_and\_phase()**.



Pianta2, 5-11 November

Figura 4.3. Grafico in frequenza del modulo e della fase dell'impedenza al passare dei giorni, prodotto dalla funzione plot\_module\_and\_phase()

All'interno del test poi verrà stampato il seguente titolo:

----- SENSORS VALUES BEFORE THE DIFF -----

per indicare che i risultati che verranno stampati di seguito si riferiscono ai dati acquisiti dai sensori, senza che gli sia applicata nessuna elaborazione. Dopo di ciò verrà eseguito il test di adfuller sui dati acquisiti dai sensori per verificare se sono stazionari o meno. Conoscere se un segnale è stazionario è utile per il test di causalità di Granger, perché ha come ipotesi che i segnali su cui viene applicato siano stazionari. La stazionarietà è verificata tramite la funzione **adfuller\_test()** che riceve in ingresso un set di dati e il nome con cui si vuole identificarli, ad esempio "Moiusture [KPa]". Questa funzione applicherà il test di **adfuller()** sul set di dati ricevuto e stamperà sulla Console dell'IDE Python i risultati ottenuti dal test con indicato nel titolo il nome del set di dati analizzato. Inoltre questa funzione ritornerà anche una stringa con scritto "is Stationary" o "is NOT Stationary". Nella figura 4.4 viene mostrato ciò che viene stampato della funzione **adfuller\_test()**.

Figura 4.4. Risultati ottenuti dalla funzione adfuller\_test(), per sapere se un segnale è stazionario.

Essendo che si è notato che spesso i segnali acquisiti dai sensori non sono stazionari si è applicato l'adfuller test anche sui dati dei sensori elaborati dalla funzione **diff()**. Questa funzione crea un nuovo set di dati in cui ogni valore indica la differenza tra i due campioni successivi acquisiti. Il titolo stampato prima di riportare i risultati del test di adfuller sui dati elaborati è:

----- SENSORS VALUES AFTER THE DIFF ------

A questo punto nel test inizia un ciclo for che permette di selezionare ad ogni giro il segnale di impedenza corrispondente alla frequenza di stimolo *freq*, con *freq* appartenente alle *target\_freqs*. Viene quindi stampato dal programma il titolo:

--->Impedence module and angle BEFORE DIFF:

e poi vengono riportati i risultati dell'adfuller test sia per il modulo che per la fase dell'impedenza.

Poi viene stampato:

--->Impedence module and angle AFTER DIFF:

e riportati i risultati dell'adfuller test applicato ai segnali di modulo e fase elaborati dalla funzione **diff()**. Inoltre nelle variabili *stationarity\_mod* per il modulo e *stationarity\_phase* 

per la fase viene salvato se il segnale è stazionario o meno, in base al risultato ottenuto dal test di adfuller.

Per ogni frequenza si avranno in conclusione le informazioni riguardanti la stazionarietà organizzate come riportato nella seguente figura.

```
--->Impedence module and angle BEFORE DIFF:
Results of Augmented DF Test on "Impedance Module" at the frequency of 863 Hz
       Null Hypothesys: Data has unit root. Non-stationary.
      p-value = 0.13
       Number of observations used= 341
          Critical value 1% = -3.986
           Critical value 5% = -3.423
           Critical value 10% = -3.135
       => Series is NON Stationary.
Results of Augmented DF Test on "Impedance Angle" at the frequency of 863 Hz
       Null Hypothesys: Data has unit root. Non-stationary.
      p-value = 0.0956
N lags used = 7
       Number of observations used= 341
          Critical value 1% = -3.986
          Critical value 5% = -3.423
          Critical value 10% = -3.135
       => Series is NON Stationary.
---->Impedence module and angle AFTER DIFF:
Results of Augmented DF Test on "Impedance Module" at the frequency of 863 Hz
       Null Hypothesys: Data has unit root. Non-stationary.
      p-value = 0.0
N lags used = 6
       Number of observations used= 341
          Critical value 5% = -3.423
          Critical value 10% = -3.135
       => Series is Stationary.
```

Figura 4.5. Risultati dell'adfuller test ottenuti per ogni segnale di impedenza misurato a una data frequenza di stimolo.

Dopo aver testato la stazionarietà dei segnali acquisiti dai sensori e dei dati di impedenza si procede con l'applicazione del test di causalità di tipo Granger per valutare la causalità tra i segnali dei sensori e i segnali di modulo e fase. Questo test è applicato sui dati processati dalla funzione **diff()** perché dalle analisi effettuate si è notato che questi segnali soddisfano più frequentemente la condizione di stazionarietà.

Il test è stato eseguito tramite la funzione **Granger\_causality\_test()**, a cui sono stati passati principalmente:

- un DataFrame composto dai segnali ambientali e di impedenza dopo la differenza
- il valore di ritorno del test di adfuller applicato ai segnali, processati tramite la differenza, di: modulo, fase e ambientali. Valore che indica se il segnale è stazionario o non stazionario.

La funzione **Granger\_causality\_test()** calcola la causalità del segnale di modulo e di fase con tutti i segnali ambientali e produce una matrice in cui per ognuna di queste coppie indica la probabilità di non causalità. In questa figura inoltre vengono inseriti i valori di ritorno del'adfuller test così da sapere se il valore di causalità riportato si può ritenere accettabile o se invece l'ipotesi di stazionarietà non è verificata e quindi i valori riportati non vanno tenuti in considerazione perché non attendibili.

In figura mostro un esempio di figura prodotta dalla funzione Granger\_causality\_test().



Figura 4.6. Matrice di Granger causalità prodotta dalla funzione Granger\_causality\_test()

Oltre al test di causalità viene anche applicato il test di correlazione, tramite la funzione **correlation\_test()**. Questo test è utile per analizzare quanto è forte la relazione tra due segnali, non garantisce però che sia presente causalità tra i due, è quindi fondamentale valutare questi risultati in associazione con i risultati ottenuti tramite il test di causalità di Granger.

In ingresso alla funzione correlation\_test() bisogna passare

• un DataFrame contenete i segnali ambientali e di impedenza originali, senza che siano stati quindi processati dalla diff().

Questa funzione calcolerà la correlazione tra ogni coppia presente nel DataFrame e plotterà la matrice di correlazione con i risultati ottenuti.

In figura mostro un esempio di matrice di correlazione prodotto dalla funzione correlation\_test().



Correlation Matrix at impedance stimulus: 10145 Hz Pianta2, 5-7 November

Figura 4.7. Matrice di correlazione prodotta dalla funzione correlation\_test()

Ad ogni giro del ciclo for verranno poi chiamate due funzioni:

Plot\_sensors\_and\_impedance() e Plot\_moisture\_light\_and\_impedance() che useranno i valori dei sensori e di impedenza<sup>2</sup> per creare una figura che nel primo caso, oltre a modulo e fase, contiene tutti i segnali acquisiti dai sensori mente nel secondo caso, oltre ai valori di impedenza, contiene solo i segnali di luce e umidità del terreno. Questo ultimo grafico è stato creato perché più essenziale e utile quando si vuole studiare in particolare la relazione tra l'impedenza e l'umidità del terreno. Entrambe le funzioni accettano inoltre in ingresso il valore *step*, che di default vale 24. Esso serve per indicare ogni quante ore inserire le etichette e la griglia sull'asse delle x.

 $<sup>^2{\</sup>rm I}$ valori di impedenza cambiano ad ogni giro perché sono ottenuti a seguito di un segnale di stimolo a frequenza diversa.

Di seguito è mostrato come appare un grafico prodotto dalla funzione **Plot\_sensors\_and\_impedance()**.



Figura 4.8. Grafico che mostra i dati ambientali e di impedenza, prodotto dalla funzione Plot\_sensors\_and\_impedance()

La seguente immagine invece è un esempio di figura prodotta dalla funzione Plot\_moisture\_light\_and\_impedance().



Pianta3, First Watering (8-27 Oct) Impedance measurement, stimulus signal frequency: 10145 Hz

Figura 4.9. Grafico che mostra i segnali di luce, umidità del terreno e di impedenza, prodotto dalla funzione Plot\_moisture\_light\_and\_impedance()

In fine prima di iniziare una nuova iterazione del ciclo for, con nuovi dati di impedenza, viene verificato se la frequenza attuale appartiene al vettore delle frequenze *freqs\_for\_impedance\_comparison*, se così è il segnale di impedenza viene passato, assieme ai valori dei sensori, alla funzione **temporal\_impedance\_comparison()** che grafica i segnali acquisiti dai sensori e inserisce il segnale di impedenza in un grafico, dove sono presenti anche gli altri segnali di impedenza la cui frequenza del segnale di stimolo apparteneva al vettore sopra citato. Questo grafico ha l'obbiettivo di mettere a confronto i segnali di impedenza acquisiti a varie frequenze.

Nella seguente immagine riporto un esempio di grafico prodotto dalla funzione temporal\_impedance\_comparison()




Figura 4.10. Grafico che mette a confronto i segnali di impedenza misurati con varie frequenze di stimolo, prodotto dalla funzione Plot\_moisture\_light\_and\_impedance()

Eseguite tutte queste funzioni il programma aggiornerà la frequenza, prendendo il prossimo valore all'interno del vettore *target\_freqs*, a questo valore di frequenza di stimolo per la misura di impedenza saranno associati diversi valori di modulo e fase, su cui quindi verranno applicate le funzioni viste fin qui: per la stazionarietà, per la causalità, per il calcolo della correlazione e per i grafici di questo nuovo segnale d'impedenza a confronto con i precedenti e con i valori acquisiti dai sensori.

# Approfondimento sui metodi utilizzati per l'analisi statistica dei dati acquisiti

Nello scorso capitolo ho spiegato com'è organizzato il codice per l'elaborazione e l'analisi dei dati acquisiti. Ora vorrei spiegare più in dettaglio il test di correlazione e quello di causalità di tipo Granger, utilizzati per l'analisi matematica delle relazioni osservate.

### 5.1 Test di correlazione

Il test di correlazione di Pearson serve per avere una misura della dipendenza lineare tra due variabili. Questa misura viene fornita dal coefficiente di correlazione di Pearson, calcolato sulle serie X e Y come segue:

$$\rho(X,Y) = \frac{cov(X,Y)}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N (\frac{x_i - \bar{X}}{s_X}) \cdot (\frac{y_i - \bar{Y}}{s_Y})$$
(5.1)

Dove  $\overline{X}$  è la media dei valori contenuti nella serie X, N rappresenta quanti valori contengono le serie X e Y, mentre  $s_X$  è la deviazione standard di ogni campione  $x_i$ . La formula di  $s_X$ è la seguente:

$$s(X) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^{N} (x_i - \bar{X})^2}$$

Un significato analogo si ha per  $\overline{Y}$  e  $s_Y$ .

Il coefficiente di Person  $\rho(X, Y)$  può assumere valori compresi tra -1 e 1, dove -1 corrisponde alla massima correlazione negativa, 1 identifica la massima correlazione positiva mentre 0 indica l'assenza di correlazione tra le due serie.

Nel programma Python utilizzato per l'analisi dei dati acquisiti la correlazione è stata calcolata grazie alla funzione:

```
.corr(method=Pearson)
```

Questa funzione calcola il coefficiente di correlazione di Pearson tra tutte le colonne del dataset su cui è applicata, definendo così una matrice di correlazione. Nelle nostro caso nelle colonne erano contenute le varie serie acquisite dal monitoraggio: luminosità, temperatura, umidità dell'aria, umidità del suolo, modulo e fase. Di seguito mostro un esempio di matrice di correlazione ottenuta grazie alla funzione .corr().



#### Correlation Matrix at impedance stimulus: 10145 Hz Pianta2, 5-7 November

Figura 5.1. Matrice di correlazione ottenuta grazie alla funzione Python .corr(method=Pearson)

Ogni cella della matrice contiene il coefficiente di correlazione di Pearson riferito alla riga e alla colonna corrispondenti. Si noti che la diagonale della matrice ha tutti i coefficienti pari a 1, questo è motivato dal fatto che la correlazione di due segnali identiche è massima.

### 5.2 Test di causalità di Granger

Il test di causalità di Granger è un test statistico utilizzato per determinare se una serie temporale è utile per prevederne un'altra. In particolare se i valori precedenti della serie X permettono di prevedere i valori futuri della serie Y con maggiore precisione rispetto al solo utilizzo dei valori precedenti di Y allora si può dire che la serie X Granger causa la serie Y.

#### Ipotesi

L'ipotesi per l'applicazione del test di causalità di Granger è che le serie temporali su cui viene indagata la causalità siano processi stazionari, cioè abbiamo media e varianza costanti nel tempo. Se così non è le due serie devono essere elaborate con le prime o superiori differenze. La stazionarietà dei due segnali permette di non trovare relazioni di causalità spurie, infatti se per esempio due segnali hanno lo stesso trend crescente si potrebbe trovare una causalità data dal fatto che entrambi i segnali crescono; andando invece a elaborare il segnale, rendendolo stazionario, si eliminano i contributi di trend e di media diversa da zero, ottenendo così un segnale simile a quello del rumore bianco.

#### Applicazione matematica

L'ipotesi che viene testata è l'ipotesi nulla, cioè che X non Granger-causi Y, per fare ciò si deve definire la serie uni-variata di auto-regressione di Y(t), mostrata nella seguente equazione 5.2, dove i coefficienti  $a_i$  indicano il peso di ogni valore ritardato, basandosi sui valori ottenuti dalla statistica t, che fornisce una misura della significatività di quel valore per la regressione, il valore m indica l'ordine della regressione e il valore  $E_1(t)$  rappresenta l'errore di previsione. Per selezionare un consistente ordine del modello si possono utilizzare due criteri: BIC (Bayesian Information Criteria) o AIC (Akaike Information Criteria), oppure conoscendo la natura della relazione di causalità indagata si può impostare il valore m desiderato. Il criterio di informazione AIC viene solitamente utilizzato in caso si temi che il modello BIC porti a un numero troppo ristretto di ritardi.

$$Y(t) = Y_1(t) + E_1(t) = a_0 + \sum_{i=1}^m a_i \cdot Y(t-i) + E_1(t)$$
(5.2)

Successivamente viene stimata l'auto-regressione aumentata, che include anche i valori ritardati della serie X nel il calcolo di Y(t), come mostrato nella seguente equazione.

$$Y(t) = Y_2(t) + E_2(t) = a_0 + \sum_{i=1}^m a_i \cdot Y(t-i) + \sum_{n=1}^m b_n \cdot X(t-n) + E_2(t)$$
(5.3)

I coefficienti  $b_n$  utilizzano il valori calcolati tramite la statistica t per pesare i rispettivi campioni X(t-n) se e solo se congiuntamente agli altri valori ritardati X(t-n) aggiungono potere predittivo alla serie  $Y_2(t)$ , altrimenti assumono il valore nullo. Per calcolare la significatività congiunta di un campione viene effettuato il test-F, la cui ipotesi nulla è che i campioni aggiunti non diano un maggiore potere predittivo alla regressione  $Y_2(t)$ . Il valore F viene calcolato con la seguente formula:

$$F = \frac{\frac{SSE_{Y_1(t)} - SSE_{Y_2(t)}}{m}}{\frac{SSE_{Y_2(t)}}{n-k}}$$
(5.4)

Dove: SSE (*Residual Sum of Squares*) è la somma delle differenze tra i valori osservati e quelli predetti al quadrato, m è il numero di coefficienti, n è il numero di misure e k è il numero di variabili indipendenti.

Per rigettare l'ipotesi nulla del test-F, e quindi affermare che la serie X Granger causa la serie Y, il valore F deve essere superiore di una certa soglia, chiamata valore critico, il quale è tabulato e dipende dal valore di affidabilità  $\alpha$  desiderato.

Nel programma utilizzato per l'analisi dei dati per verificare l'ipotesi di stazionarietà dei segnali monitorati si è utilizzata la funzione Python:

#### r = adfuller(series, regression='ctt')

la quale applica il test di Dickey-Fuller aumentato alla serie *series*. Dove con il parametro *ctt* si intende che la regressione può essere costante, lineare e quadratica. L'ipotesi nulla del test di adfuller è che la serie presenti una radice unitaria, l'alternativa è l'essere stata generata da un processo stazionario. Basta quindi valutare la probabilità dell'ipotesi nulla per verificare se si può respingere, con un certo livello di affidabilità. Nel nostro programma il livello di affidabilità è stato impostato al 5%, quindi se p<0.05 allora si può dire che il segnale è stazionario.

Dato che il trend e la la media non nulla dei segnali acquisiti davano nella maggior parte dei test risultati di non stazionarietà le serie sono state elaborate attraverso la funzione:

#### .diff()

che calcola le differenze prime di tutte le serie. Si è infine applicato il test di causalità di Granger sui segnali elaborati, attraverso la funzione:

#### r = grangercausalitytests(data[[r, c]], maxlag=maxLag, verbose=False)

Dove con la precedente notazione si verifica se la sere c, appartenente al DataFrame da-ta, Granger-causa la serie r, appartenente allo stesso DataFrame. Il test viene condotto utilizzando da 0 a maxLag valori ritardati e la probabilità associata ad ogni ritardo, di non causalità, viene salvata in un vettore. Nella matrice di Granger, di seguito mostrata, viene riportata la minima probabilità dell'ipotesi nulla di Granger che afferma: la serie corrispondente alla colonna non Granger causa la serie corrispondente alla riga corrispettiva.





Figura 5.2. Matrice di Granger che riporta la minima probabilità che la serie corrispondente alla colonna non Granger-causi la serie associata alla riga corrispettiva.

Come si può osservare inoltre sotto il titolo è indicato se le serie sono stazionarie secondo il test aumentato di Dickey–Fuller, basato su un affidabilità del 5%.

## Parte I

# Andamento di modulo e fase in risposta agli stimoli esterni

## Introduzione

In questa sezione voglio mostrarvi le relazioni osservate tra l'andamento dell'impedenza della pianta e i segnali acquisiti dai sensori, soffermandomi in particolare sul comportamento del modulo e della fase della pianta in risposta a condizioni di stress idrico, intese come eccesso o carenza di acqua. Per osservare la pianta in queste condizioni è stato svolto un esperimento in cui non abbiamo bagnato la pianta o lo abbiamo fatto in maniera eccessiva. Oltre a riportare le relazioni osservate mostrerò e commenterò anche i risultati statistici ottenuti dal test di correlazione e di causalità di tipo Granger.

L'interesse principale dello studio è la relazione tra impedenza e umidità del suolo, ciononostante è importante osservare anche le relazioni con gli altri parametri per avere un quadro più completo dell'andamento del modulo e della fase, e quindi riuscire a discernere se un comportamento è causato esclusivamente dall'umidità del terreno o vi è l'influenza degli altri parametri ambientali, come magari il cambiamento di temperatura o il passaggio da giorno a notte.

Le piante di tabacco di cui parlerò nei seguenti capitoli sono chiamate *pianta1*, *pianta2* e *pianta3*. *Pianta2* e *pianta3* in particolare sono state selezionate perché a inizio esperimento erano le due piante che più si assomigliavano dal punto di vista dello sviluppo e della rigogliosità e presentavano inoltre la stessa dimensione di vaso e tipologia di terriccio. Nella seguente immagini mostro le tre piante ad inizio esperimento.

#### Introduzione



Figura 6.1. Piante di tabacco utilizzate nell'esperimento, da sinistra verso destra si ha rispettivamente: *pianta1, pianta2 e pianta3.* 

I dati ambientali e di impedenza sono stati acquisiti una volta ogni ora per circa un mese e mezzo, in particolare il monitoraggio è partito l'8 ottobre e si è concluso il 19 novembre.

# Comportamento dell'impedenza in relazione ai valori ambientali misurati

Ho sottoposto i valori acquisiti per ogni pianta a un'indagine lungo l'intero periodo di monitoraggio, questa è servita per ottenere un quadro globale dell'evolversi di modulo e fase lungo un arco temporale abbastanza ampio da mostrare e rendere apprezzabili le variazioni a lungo termine. Dopo l'indagine a lunga durata ho studiato il comportamento della pianta in determinate sottosezioni di interesse, per osservare e analizzare la risposta della pianta a determinati stimoli, indotti in parte durante l'esperimento, e in parte originati a livello naturale.

L'immagine 7.1 mostra l'impedenza di *pianta1* e i valori acquisiti dai sensori lungo l'intero periodo di monitoraggio, quindi tra l'8 e il 19 novembre. In particolare i primi due grafici, con i segnali di color rosso, mostrano il modulo e la fase acquisiti a seguito di un segnale di stimolo di 10.145kHz, mentre gli ultimi quattro presentano rispettivamente: luce, umidità del terreno, temperatura e umidità dell'aria.

Con il seguente grafico (7.1) voglio mostrare che sia il modulo che la fase sono composti da un segnale che definisce l'andamento a lungo termine e da una componente ripetitiva, che si presenta sotto forma di "dune" giornalmente, che si somma all'andamento principale. Dal macro-andamento osserviamo che il segnale d'impedenza segue, in modo speculare, il segnale di umidità del terreno; al decrescere dell'umidità infatti il modulo e la fase aumentano mentre a seguito degli eventi di irrigazione entrambi i segnali diminuiscono di valore; tutto questo avviene in modo proporzionale alle variazioni dell'umidità del suolo. La componente ripetitiva dei segnali di modulo e fase invece si può notare che è presente anche nei segnali di luce, temperatura e umidità dell'aria.



Pianta1, Experiment 8 October - 19 November Impedance measurement, stimulus signal frequency: 10145 Hz

Figura 7.1. Grafico che mostra le due componenti che formano i segnali di modulo e fase: quella che definisce il trend e quella che aggiunge il contributo ripetitivo

Determinato quindi che i segnali di modulo e fase sono composti da una macrocomponente che ne definisce l'andamento principale e da una componente ripetitiva che caratterizza il segnale a livello locale, ho deciso di analizzare in modo separato i contribuiti dati da: luce, temperatura e umidità dell'aria da quelli forniti dagli eventi di irrigazione, rappresentati dall'andamento dell'umidità del terreno. Nelle analisi cercherò di discernere il comportamento di modulo e fase al variare dei due set di parametri ambientali così da riuscire ad interpretare le cause che definiscono l'andamento dell'impedenza. L'obbiettivo infatti è, proseguendo con la ricerca, quello di riuscire a prevedere quando bagnare la pianta valutando esclusivamente le variazioni di modulo e di fase, è quindi importante conoscere se sono presenti andamenti non collegati alla necessità di acqua. Senza considerare che procedendo con la ricerca si possa capire la giusta esposizione della pianta o la giusta quantità di acqua da utilizzare nell'irrigazione, questo andando ad osservare la risposte del modulo e della fase a determinate condizioni di temperature ambientale e di quantità di acqua utilizzata per l'irrigazione.

## Reazione dell'impedenza al ciclo giorno-notte

La forte relazione presente tra luminosità, temperatura e umidità dell'aria sono la ragione per cui le sto trattando assieme in questo capitolo. Tutti e tre questi parametri hanno infatti un comportamento che si ripete ogni giorno, i livelli di luce e temperatura in particolare aumentano di giorno per poi diminuire di notte, mentre l'umidità dell'aria si comporta in maniera opposta, aumentando nelle ore notturne e diminuendo durante il giorno. Ovviamente le variazioni sono più o meno intense in base al clima della giornata, fattori come la presenza del sole o delle nuvole, e l'alternarsi delle stagioni provocano quindi differenti variazioni nel modulo e nella fase della pianta. Nella seguente immagine mostro quanto evidenziato riguardo alla relazione di luminosità, temperatura e umidità dell'aria.



Figura 8.1. Grafico che mostra la forte relazione presente tra luminosità, temperatura e umidità dell'aria.

Per spiegare l'andamento del modulo e della fase in relazione ai dati ambientali ho selezionato un periodo ristretto di giorni, così da riuscire a mostrare chiaramente l'andamento, senza però compromettere l'evidenza della ripetitività di questo comportamento. Inoltre, per semplicità, ho riportato i grafici ottenuti a una sola frequenza di stimolo, per poi solo alla fine mettere a confronto i vari segnali di impedenza ottenuti alle varie frequenze di stimolo, nel rage 40 Hz - 1 MHz.

In particolare nel seguente grafico mostra i valori riferiti a *pianta2* nella settimana dal 5 al 11 novembre, con i valori di impedenza misurati a seguito della frequenza di stimolo: 10.145 kHz.



Pianta2, 5-11 November Impedance measurement, stimulus signal frequency: 10145 Hz

Figura 8.2. Grafico che mostra l'influenza che luminosità, temperatura e umidità dell'aria hanno sul modulo e sulla fase della pianta. Ad esempio è riportata Pianta2 misurata alla frequenza di stimolo di 10.145 kHz, nel periodo 5-11 Novembre.

Dal grafico si osserva che il segnale di temperatura e quello di umidità dell'aria sono quasi perfettamente speculari, i massimi e i minimi della temperatura infatti corrispondono rispettivamente ai minimi e ai massimi dell'umidità dell'aria, questo con un margine massimo di un ora. Inoltre l'andamento della temperatura da un picco al successivo segue un primo tratto in cui decresce con andamento convesso fino alle prime ore del mattino, circa intorno alle 8:44, e poi sempre con una curva convessa la temperatura sale rapidamente raggiungendo il massimo circa tra l'una e le tre. L'umidità dell'aria invece da un minimo al successivo cresce fino al mattino per poi decrescere rapidamente, la differenza è che l'andamento per l'umidità dell'aria è concavo. I picchi della luce invece si verificano o in anticipo di massimo due ore o in corrispondenza dei massimi di temperatura.

Per quanto riguarda invece il comportamento giornaliero dell'impedenza della pianta si nota che in corrispondenza dei picchi di luminosità il modulo inizia ad aumentare seguendo due andamenti, un primo tratto di crescita rapida e un secondo tratto di crescita lenta, rispettivamente raggiunti circa alle 22:44 e 5:44, poi l'andamento del modulo decrescente velocemente raggiungendo il minimo in corrispondenza del picco di luminosità. L'andamento descritto per il modulo è molto simile a quello mostrato in precedenza per l'umidità dell'aria. Per quanto riguarda invece la fase, il grafico lungo la settimana mostra due comportamenti, nei primi due giorni in particolare la fase dopo il picco di temperatura inizia ad aumentare fino circa alle 01:44 per poi diminuire fino al prossimo picco di temperatura. A differenza del modulo quindi sembra essere più relazionata al picco di temperatura rispetto a quello di luminosità. Il secondo comportamento che la fase presenta invece è mostrato negli ultimi tre giorni, qui l'andamento è completamente diverso, la curva della fase tra un picco di temperatura e il successivo infatti non sembra più una "duna" con massimo intorno all'01:44 ma assomiglia più a una "guglia", dal punto di vista matematico potrei dire che l'andamento assomiglia a quello di una gaussiana con media traslata verso il secondo picco di temperatura e varianza abbastanza bassa. I picchi in questo caso non corrispondono a nessun altro parametro monitorato, ma osservando che il primo giorno si presenta alle 10:44 mentre gli ultimi due giorni si verificano alle 11:44 si può dire che si presentano in mattinata, dopo l'inizio dell'aumento delle temperature e prima del picco massimo di temperatura. Questo cambio di andamento potrebbe essere causato dallo stress idrico da carenza di acqua.

# 8.1 Risultati statistici del test di correlazione e di causalità

#### Risultati del test di correlazione

I risultati ottenuti dal test di correlazione applicato a *pianta2* nell'intervallo temporale 5-11 Novembre, con frequenza di stimolo per la misura di impedenza pari a 10.145 kHz, sono riportati nella seguente figura.



Pianta2, 5-11 November Correlation Matrix at impedance stimulus: 10145 Hz

Figura 8.3. Matrice di correlazione che mostra la relazione di: luminosità, temperatura e umidità dell'aria con l'impedenza di Pianta2misurata a 10.145 kHz, nel periodo 5-11 Novembre.

Per quanto riguarda la relazione tra i sensori la matrice di correlazione conferma la forte relazione negativa notata tra la temperatura e l'umidità dell'aria, pari a -76, mostra inoltre una forte correlazione tra temperatura e luce, pari a 0.52 e una discreta correlazione tra umidità dell'aria e luce, pari a -0.46. Per quanto riguarda invece la relazione del modulo e della fase con i sensori ambientali la matrice mostra che il modulo presenta una correlazione negativa discreta con la luce, pari a -0.45, mentre la fase non sembra essere apprezzabilmente correlata con nessun parametro. Considerando però che la fase presentava due andamenti diversi all'inizio rispetto alla fine della settimana, causati dallo stress idrico, ho diviso la settimana in due sezioni e riapplicato il test di correlazione.



Nella seguente figura mostro le acquisizioni effettuate su *pianta2* nella prima sezione di giorni, dal 5 al 7 novembre.

Figura 8.4. Grafico che mostra l'influenza che luminosità, temperatura e umidità dell'aria hanno sul modulo e sulla fase della pianta. Il grafico riporta la sottosezione temporale 5-7 Novembre di *Pianta2*, misurata alla frequenza di stimolo di 10.145 kHz.

La matrice di correlazione in questo caso conferma la relazione tra i parametri di luce, umidità dell'aria e temperatura, mostra inoltre una discreta correlazione negativa tra il modulo e sia la luce che la temperatura, pari rispettivamente a -0.47 e -0.4. Per quanto riguarda la fase invece la matrice conferma la forte relazione osservata con: umidità dell'aria, luce e temperatura, di valore rispettivamente pari a 0.7, -0.6 e -0.49.



Correlation Matrix at impedance stimulus: 10145 Hz Pianta2, 5-7 November

Figura 8.5. Matrice di correlazione che mostra la relazione di: luminosità, temperatura e umidità dell'aria con l'impedenza di *Pianta2* misurata a 10.145 kHz, nel periodo 5-7 Novembre.



Di seguito invece è mostrata la seconda sotto-sezione analizzata di *pianta2*, nel periodo 8-11 novembre.

Figura 8.6. Grafico che mostra l'influenza che luminosità, temperatura e umidità dell'aria hanno sul modulo e sulla fase della pianta. Il grafico riporta la sottosezione temporale 8-11 Novembre di *Pianta2*, misurata alla frequenza di stimolo di 10.145 kHz.

La matrice di correlazione mostra una forte relazione tra modulo e luce, temperatura e umidità dell'aria, con rispettivamente correlazione pari a -0.9, -0.72 e 0.67. Per quanto riguarda invece la fase la correlazione forte si presenta con la luce, ed è paria a 0.63. Con la temperatura e l'umidità dell'aria invece la fase presenta una relazione più lieve pari rispettivamente a 0.32 e -0.32, si nota al contrario una forte correlazione con l'umidità del terreno. L'influenza dello stress idrico potrebbe essere la ragione della diminuzione di correlazione con la temperatura e l'umidità.



#### Correlation Matrix at impedance stimulus: 10145 Hz Pianta2, 8-11 November

Figura 8.7. Matrice di correlazione che mostra la relazione di: luminosità, temperatura e umidità dell'aria con l'impedenza di Pianta2 misurata a 10.145 kHz, nel periodo 8-11 Novembre.

#### Risultati del test di causalità di tipo Granger

Per quanto riguarda il test di causalità di Granger ho riportato esclusivamente i risultati ottenuti dalle analisi nell'intero periodo di analisi di *pianta2* 5-11 novembre, dato che gli esiti del test sono molto simili ai risultati ottenuti nelle due sotto-analisi.



Figura 8.8. Matrice di Grager che mostra le probabilità che: luminosità, temperatura e umidità dell'aria non Granger-causino le variazioni nel modulo e nella fase di *Pianta2* misurato a 10.145 kHz, nel periodo 5-11 Novembre.

La matrice di causalità di Granger mostra in modo molto forte che temperatura, umidità dell'aria e luminosità influenzano e causano l'andamento del modulo e dell'angolo, infatti le celle corrispondenti mostrano una probabilità dell'ipotesi nulla, di non causalità, inferiore a 0.05. Inoltre nel sottotitolo sia i segnali ambientali che quelli di impedenza presentano la dicitura "is Stationary" che implica che i segnali hanno superato il test di stazionarietà aumentato di Dickey-Fuller e quindi i risultati ottenuti dal test di causalità di tipo Granger sono attendibili.

### 8.2 Confronto tra i segnali di impedenza misurati a varie frequenze di stimolo

Andando ora a fare l'analisi delle variazioni indotte dal ciclo giorno-notte non semplicemente sul segnale di impedenza misurato alla frequenza di 10.145 KHz, come ho fatto finora, ma anche alle altre frequenze con cui è stata stimolata la pianta si nota, come mostrato nel grafico 8.9, che a bassa frequenza di stimolo corrisponde una media del segnale di modulo e fase più alta e delle variazioni maggiori, mentre ad alta frequenza di stimolo il segnale medio sia per il modulo che la fase ha un valore minore con delle variazioni indotte che si discostano meno dal valore medio.

Nella seguente immagine metto a confronto, su scala temporale, i segnali di modulo e fase acquisiti alle frequenze di stimolo: 863Hz, 2.007kHz, 4.994 kHz, 10.145 kHz, 41.877 kHz, 100.724 kHz e 204.639 kHz



Comparison of impedance measured at various stimulus frequencies Pianta2, 5-11 November

Figura 8.9. Grafico che mette a confronto, su scala temporale, il modulo e la fase misurati a varie frequenze di stimolo, con focus sulle variazioni indotte dal ciclo giorno-notte. La pianta analizzata è Pianta2 nel periodo di tempo 5-11 Novembre.

# Risposta impedenziometrica della pianta allo stress idrico

Ho poi analizzato il macro andamento del modulo e della fase nell' intorno degli eventi di irrigazione. L'andamento del modulo della fase prima dell'evento di irrigazione è stato studiato per trovare un riscontro del malessere della pianta legato allo stress idrico, in particolare si voleva vedere se l'andamento cambiava in modo sostanziale quando la pianta iniziava a soffrire la carenza di acqua. L'andamento di modulo e fase a seguito dell'evento di irrigazione invece è stato osservato per capire la risposta della pianta all'irrigazione dopo uno stato di stress da carenza idrica. Si è inoltre studiata la risposta dell'impedenza, di una pianta sana, a seguito di un'irrigazione idonea o eccessiva.

### 9.1 Reazione a carenza idrica

Nella seguente figura mostro *pianta3* nell'intervallo di tempo dall'8 al 27 ottobre, con i valori di impedenza acquisiti alla frequenza di stimolo: 10.145 kHz. Questo grafico mostra nei primi quattro giorni l'andamento di modulo e fase dopo l'irrigazione dell'8 ottobre, poi mostrare l'andamento dopo che la pianta inizia a patire la disidratazione, i cui livelli più critici sono raggiunti il 16 ottobre, giorno in cui la pianta viene irrigata perché troppo sofferente. I giorni seguenti il 16 ottobre mostrano nei primi giorni la risposta della pianta all'irrigazione e negli ultimi la ripresa di un andamento che mostra un leggero stress idrico.



Pianta3, First Watering (8-27 Oct) Impedance measurement, stimulus signal frequency: 10145 Hz

Figura 9.1. Grafico che mostra la risposta del modulo e della fase della pianta allo stress idrico e al successivo evento di irrigazione. Il grafico si riferisce a pianta3 nel periodo 8-27 ottobre e a una frequenza di stimolo per la misura di impedenza pari a 10.145 kHz.

Nella seguente immagine mostro *pianta3* ad inizio esperimento, l'8 ottobre, dopo essere stata irrigata con circa 400 ml di acqua; come si può vedere le foglie della pianta sono rigogliose e la pianta mostra un aspetto sano.



Figura 9.2. Foto che mostra lo stato di buona salute di *pianta3* all'inizio dell'esperimento, l'8 ottobre.

Il modulo, in figura 9.1, in risposta all'irrigazione del 8 ottobre decresce per circa 4 giorni, fino al 12 ottobre, mentre la fase rimanere costante. Il modulo poi rimane costante per tre giorni mentre la fase aumenta fino ad arrivare al 15 ottobre, giorno in cui lo stato di salute della pianta è mostrato nella seguente immagine. Nella fotografia si nota che rispetto al primo giorno le foglie sono leggermente più mosce.



Figura 9.3. Foto che mostra lo stato di salute di *pianta3* il 15 ottobre, dopo 7 giorni dall'irrigazione dell'8 ottobre.

Dal grafico 9.1 poi si nota un rapido aumento di modulo e diminuzione di fase fino al 19 ottobre, giorno in cui è stata irrigata la pianta. Nella seguente immagine mostro il grave stato di disidratazione della pianta, raggiunto il 19 ottobre, nella fotografia infatti si vedono chiaramente alcune foglie completamente ingiallite e altre mosce.



Figura 9.4. Foto che mostra lo stato di stress idrico di pianta3il 19 ottobre, dopo 11 giorni dall'irrigazione dell'8 ottobre.

Nelle ore dopo l'evento di irrigazione si nota nel grafico 9.1 che il modulo decresce molto rapidamente, per poi continuare a decrescere più lievemente fino al 23 ottobre, la fase invece aumenta in modo moderato fino alla stessa data. Come si può vedere dalla seguente immagine 9.5 le foglie della pianta, già il giorno dopo l'irrigazione, presentavano un aspetto rigoglioso.



Figura 9.5. Foto che mostra la ripresa di pianta 3già all'indomani dell'evento di irrigazione del 19 ottobre.

L'andamento del modulo e della fase osservati in relazione allo stato di salute della pianta sembrano mostrare che il modulo aumenta notevolmente con l'inizio dello stress idrico mentre la fase in un primo periodo aumenta per poi però diminuire. Tuttavia studiando tutti gli eventi di irrigazione di *pianta3*, ma anche di *pianta2* e *pianta1*, si osserva che mentre l'andamento del modulo è sempre crescente con l'inizio dello stress idrico la fase in alcuni casi, come mostrato nel precedente grafico 9.1, cresce in un primo tratto per poi decresce e in altri casi è sempre crescente fino al nuovo evento di irrigazione.

Nella seguente immagine mostro il caso in cui l'andamento della fase è crescente in tutto il periodo di stress idrico precedente all'irrigazione.



Figura 9.6. Grafico che conferma la risposta del modulo allo stress da carenza idrica e che mostra l'altro comportamento della fase osservato in precedenza all'evento di irrigazione, cioè un andamento sempre crescente. Il grafico si riferisce a *pianta1* nel periodo dal 28 ottobre al 16 novembre, con frequenza di stimolo per la misura di impedenza pari a 10.145 kHz.
Il tratto decrescente della fase, a seguito di un periodo di crescita, osservato nel grafico 9.1, riferito a *pianta3*, potrebbe indicare uno stato di malessere della pianta più avanzato; c'è la possibilità quindi che la ragione per cui il tratto decrescente non è sempre presente prima degli eventi di irrigazione sia il livello di gravità della salute della pianta. Sostengo questa ipotesi perché *pianta1* durante gli esperimenti è stata l'unica pianta a non essere mai stata esposta a forti condizioni di stress da carenza idrica, ed infatti la sua fase non presenta mai tratti decrescenti prima degli eventi di irrigazione, ma solo crescenti, a differenza di quanto osservato in precedenza all'evento d'irrigazione di *pianta3*, del giorno 16 ottobre (9.1), andamento associato a una condizione di stress idrico molto forte, mostrata nella precedente fotografia 9.4.

#### Risultati statistici del test di correlazione e di causalità 9.1.1

Riporterò ora i risultati statistici ottenuti dall'analisi di *pianta3* nel periodo di tempo tra l'8 e il 27 ottobre, periodo in cui pianta3 è stata sottoposta a un forte stress da carenza idrica seguito da un corretto evento di irrigazione. I risultati statici si riferiscono ai segnali di impedenza misurati a seguito di una frequenza di stimolo pari a 10.145 kHz.

Le seguenti immagini mostra i risultati ottenuti dal test di correlazione e di causalità di tipo Granger.



Correlation Matrix at impedance stimulus: 10145 Hz Pianta3, First Watering (8-27 Oct)

Figura 9.7. Risultati del test di correlazione nell'intorno dell'evento di irrigazione del 19 ottobre di pianta3. Il test è applicato ai segnali di impedenza misurati grazie a un segnale di stimolo di frequenza pari a 10.145 kHz.





Figura 9.8. Risultati del test di causalità di tipo Granger nell'intorno dell'evento di irrigazione del 19 ottobre di *pianta3*. Il test è applicato ai segnali di impedenza misurati grazie a un segnale di stimolo di frequenza pari a 10.145 kHz.

Dai risultati statistici non viene individuata una significativa correlazione del modulo e della fase con l'umidità del terreno, tuttavia l'ipotesi nulla di Granger, di non causalità, viene fortemente respinta. E' quindi verificata la causalità tra l'umidità del terreno e i segnali di impedenza. Per quanto invece riguarda il secondo evento di irrigazione in precedenza discusso (9.6), riferito a *pianta1* nel periodo 28 ottobre - 16 novembre, i risultati statistici di correlazione e causalità di tipo Granger sono riportati di seguito.



Figura 9.9. Risultati del test di correlazione nell'intorno dell'evento di irrigazione del 11 novembre di *pianta1*. Il test è applicato ai segnali di impedenza misurati grazie a un segnale di stimolo di frequenza pari a 10.145 kHz.



Figura 9.10. Risultati del test di causalità di tipo Granger nell'intorno dell'evento di irrigazione del 11 novembre di *pianta1*. Il test è applicato ai segnali di impedenza misurati grazie a un segnale di stimolo di frequenza pari a 10.145 kHz.

In questo caso l'analisi di correlazione mostra una forte correlazione negativa dell'umidità del terreno sia con il modulo che con la fase, con valori rispettivamente di -0.46 e -0.68. Il test di Granger inoltre attesta che l'umidità del terreno Granger-causa le variazioni di modulo e fase della pianta.

### 9.1.2 Confronto della risposta impedenziometrica misurata a varie frequenze di stimolo

A livello quantitativo le variazioni di modulo e fase in risposta allo stress idrico e al successivo evento di irrigazione variano a seconda della frequenza del segnale di stimolo utilizzato per la misura di impedenza. Voglio ora mettere a confronto la risposta impedenziometrica di *pianta3* e *pianta1* a seguito di diverse frequenze di stimolo; risposta che in precedenza è stata mostrata nei grafici 9.1 e 9.6 in corrispondenza della sola frequenza di stimolo 10.145 kHz.

Nei seguenti grafici 9.1.2 e 9.1.2 metto a confronto, su scala sia temporale che in frequenza, i segnali di modulo e fase. Sulla sinistra in particolare vengono messi a confronto, su scala temporale, i segnali di modulo e fase misurati alle seguenti frequenze di stimolo: 863Hz, 2.007kHz, 4.994 kHz, 10.145 kHz, 41.877 kHz, 100.724 kHz e 204.639 kHz; sulla destra invece viene riportato lo spettro completo dei segnali di impedenza acquisiti in vari giorni, in particolare è stato riportato uno spettro ogni tre giorni, così da non avere un grafico troppo fitto.



Figura 9.11. Confronto di modulo e fase misurati a varie frequenze, con focus sulla risposta a condizioni di stress da carenza idrica. La pianta analizzata è Pianta3 nel periodo di tempo 8-27 ottobre.



Figura 9.12. Confronto di modulo e fase misurati a varie frequenze, con focus sulla risposta a condizioni di stress da carenza idrica. La pianta analizzata è *Pianta1* nel periodo di tempo 28 ottobre - 16 novembre.

Dai grafici 9.1.2 e 9.1.2 si osserva in modo inequivocabile che, come già mostrato per le variazioni di impedenza indotte dal ciclo giorno-notte, a bassa frequenza il modulo ha un valore medio maggiore e delle variazioni, indotte dagli stimoli esterni, più marcate; la fase invece ha lo sfasamento minimo intorno ai centinaia di Hz e aumenta fino alle centinaia di kHz, per quanto concerne invece le variazioni si osservano due comportamenti diversi, nel grafico 9.1.2 si hanno maggiori variazioni sotto 1kHz mentre nel grafico 9.1.2 vengono evidenziate maggiori cambiamenti ad alta frequenza, dopo circa i 10kHz.

### 9.2 Reazione a eccesso idrico

Di seguito voglio mostrare la risposta del modulo e della fase della pianta a un'irrigazione corretta e a un'irrigazione eccessiva. In particolare a inizio esperimento *pianta2* e *pianta3* sono state irrigate con la stessa quantità di acqua, circa 400 ml, *pianta2* però a differenza di *pianta3* presentava già un terreno abbastanza umido, la quantità di acqua utilizzata quindi per la sua reazione è stata eccessiva.

Gli indicatori che mi fanno affermare l'eccessiva irrigazione di *pianta2* sono che: gran parte dell'acqua utilizzata per l'irrigazione in *pianta2* è finita rapidamente nel sottovaso e che l'umidità del terreno è rimasta nulla per circa una settimana.

Nella seguente figura mostro il sottovaso delle due piante non appena si è irrigato il terreno, sulla sinistra è mostrata *pianta2* con il sottovaso colmo di acqua mentre sulla destra vi è pianta3 la cui acqua è stata correttamente assorbita dal terreno.



Figura 9.13. L'acqua nel sottovaso della pianta di sinistra è prova dell'eccessiva irrigazione di *pianta2*.

Con la seguente immagine invece voglio mostrare l'andamento dell' umidità del terreno delle due piante. Dal grafico si vede chiaramente che l'umidità di *pianta2* rimane costante per 7 giorni, a differenza di *pianta3* la cui umidità del terreno inizia a decrescere già dopo tre giorni, questo conferma l'eccessiva irrigazione di *pianta2*.



Figura 9.14. Grafico che mostra la risposta del modulo e della fase all'irrigazione. Sulla sinistra si trova *pianta3* che è stata correttamente irrigata, mentre sulla destra si trova *pianta2* che è stata eccessivamente irrigata. I valori di impedenza sono stati misurati a seguito di un segnale di stimolo di frequenza 10.145 kHz.

Facendo riferimento alla precedente immagine si può osservare la risposta del modulo e della fase all'irrigazione eccessiva o idonea. Nel caso infatti di una corretta irrigazione il modulo diminuisce e in questo caso la fase rimane abbastanza constante, a seguito invece di un irrigazione eccessiva si ha un'anomala e molto significativa crescita del modulo e della fase.L'aumento dell'impedenza a seguito di un eccessiva irrigazione potrebbe essere causata dall'asfissia radicale indotta da un eccesso di acqua nel terreno.

# Capitolo 10 Conclusioni

I fini di questa ricerca sono monitorare lo stato di salute della pianta e conoscere quanto è il giusto momento per irrigare la pianta, il tutto analizzando esclusivamente l'impedenza. Lo scorso capitolo abbiamo osservato come le variazioni di modulo e fase dovute alla necessità idrica sono molto maggiori rispetto alle variazioni giornaliere dovute dall'alternarsi del giorno e della notte. Si può quindi distinguere con certezza un aumento di modulo dovuto al piccoli di temperatura o a una necessità idrica, perché nel secondo caso la crescita è molto maggiore.

Si è inoltre notato, durante gli esperimenti, che l'aumento di modulo si verifica anche in caso di eccessiva irrigazione, questo mette le basi per un futuro studio riguardante la corretta quantità di acqua da utilizzare nell'irrigazione.

L'aumento del modulo sembra quindi risultare il sintomo principale del malessere della pianta, infatti questo andamento si presenta: a seguito del picco di temperatura, che spesso provoca uno stress della pianta associato ad ammosciamento delle foglie, con l'inizio della carenza idrica della pianta e con l'asfissia della pianta, causata da un eccesso di acqua nel substrato.

## Parte II

# Nuovo sistema di misura dell'impedenza della pianta

## Capitolo 11

# Misura dell'impedenza della pianta con la scheda ADuCM350

Visti i risultati positivi ottenuti, che mostravano la possibilità di ottenere informazioni riguardanti lo stato di idratazione della pianta dall'analisi dei valori di impedenza ci siamo proposti di sviluppare un sistema di misura d'impedenza autonomo. Per fare ciò abbiamo scelto di utilizzare la scheda Eval-ADuCM350EBZ prodotta da Analog Device, che attraverso una scheda di espansione dedicata, denominata EV-ADuCM350 BIO3Z, è capace di effettuare misure di impedenza con ottima precisione. Questa scheda infatti è un misuratore a bassa potenza e alta precisione di: corrente, tensione e impedenza. Essa inoltre è stata progettata per dare la possibilità di sviluppare applicazioni portatili come la diagnostica e il monitoraggio dei segnali vitali, è infatti anche fornita di una cella a bottone per l'alimentazione a batteria.

### 11.1 Specifiche del sistema di misura progettato

Il sistema che siamo andati a progettare doveva effettuare la misura di impedenza a 4 punti ogni 15 minuti, stimolando il dispositivo sotto misura con sinusoidi a varie frequenze. In particolare visto il limite operativo della scheda che imponeva segnali di stimolo compresi tra 80 Hz e 75 KHz si è stimolato il dispositivo sotto misura con un segnale sinusoidale con frequenze comprese tra 100 Hz e 70 KHz, con passo logaritmico.

## 11.2 Descrizione della scheda ADuCM350

I dati di questa sezione sono estrapolati direttamente dal datasheet [28].

La Eval-ADuCM350EBZ è il cuore del sistema di misura e include un microcontrollore( basato su un ARM Cortex-M3 a 16MHz) per svolgere le operazioni di calcolo, controllo e connettività; in più la scheda contiene:

• un insieme di periferiche digitali.

- una memoria FLASH e una SRAM.
- un sottosistema analogico di temporizzazione e un reset asincrono.
- un sistema di gestione della potenza.

A seguire lo schema di principio funzionale:



Figura 11.1. Diagramma a blocchi funzionale della scheda ADuCM350

L'ARM Cortex-M3 è un processore RISC (Reduced Instruction Set Computer) a 32 bit e offre fino a 20 MIPS (Million Instructions Per Second) di picco di prestazioni a 16 MHz. Il controllore DMA (Direct Memory Access) centrale viene utilizzato per spostare in modo efficiente i dati tra le periferiche e la memoria. Sono inoltre disponibili tre memorie on-chip: 384 kB di memoria flash non volatile, 16 kB EEPROM e 32 kB di SRAM.

Il dispositivo fornisce la possibilità di utilizzare vari sistemi di clock di riferimento con un'ampia gamma di prescaler. I clock disponibili sono: un oscillatore RC interno, un oscillatore a cristalli e un anello a blocco di fase (PLL).

Il sistema integra una serie di periferiche on-chip che possono essere configurate tramite il software del microcontrollore per una data applicazione. Queste periferiche includono USB, UART, I2C, I2S, il controllore di comunicazione SPI, una porta GPIO, timers per uso generale, un wake up timer e un watchdog timer.

Un PMU (Power Management Unit) fornisce al sistema quattro modalità di alimentazione che consentono vari livelli di clock e power gating per ridurre al minimo il consumo di energia. Nella modalità di ibernazione, l'attività sulle interfacce periferiche o gli eventi generati dalla conclusione del wake up timer possono svegliare il dispositivo. Sia il controllo del software che il clock gating automatico vengono utilizzati per ridurre il consumo di energia dinamica, mentre il power gating viene utilizzato per ridurre la corrente di standby.

L'AFE (Analog Front End) comprende un DAC a 12 bit, un ADC con prestazioni a 16 bit, un loop di controllo dell'amplificatore da strumentazione, un sensore di temperatura integrato, un riferimento preciso e una matrice di commutazione tra i pin. Il generatore di forme d'onda, il motore DFT(Discrete Fourier Trasformation), i filtri di ricezione e il controllore AFE disaccoppiano il nucleo del microcontrollore dalle funzioni di controllo analogico, il che si traduce in un motore di misura altamente personalizzato ed efficiente in termini di potenza. Questi blocchi vengono chiamati DSP(Digital Signal Processing) accelerators; di seguito possiamo osservare uno schema a blocchi che evidenzia il blocco dei DSP accelerators prima citato.



Figura 11.2. DSP accelerators del blocco AFE

Un'interfaccia CapTouch a sei pulsanti permette all'ADuCM350 di interfacciarsi tramite un sensore capacitivo, questa interfaccia supporta una modalità di prossimità a bassa potenza e incorpora inoltre varie tecniche di riduzione del rumore, che la rendono robusta per condizioni ambientali.



A livello fisico invece la scheda si presenta come nell'immagine 11.3.

Figura 11.3. Scheda ADuCM350

Come si può vedere dalla foto soprastante sulla scheda sono presenti vari connettori attraverso cui è possibile collegare le espansioni utili a svolgere svariate funzioni, tra queste espansioni abbiamo la EV-ADuCM350 BIO3Z da noi usata per effettuare le misure di impedenza e il modulo USB-SW/UART-EMUZ che ci ha permesso la comunicazione tra microcontrollore e PC, per il caricamento del firmware e la trasmissione dei dati raccolti. La figura 11.4 mostra la scheda EV-ADuCM350 BIO3Z.



Figura 11.4. Scheda di espansione EV-ADuCM350 BIO3Z

Questa scheda è un'espansione di input/output, essa infatti permette l'accesso ai pin AFE da 1 a 8 della scheda principale, fornendo così la possibilità di scambiare i segnali necessari alla misurazione dell'impedenza. Questa estensione presenta inoltre una precisa resistenza di riferimento, chiamata RCAL, utile alla calibrazione del sistema di misura. Nell'immagine seguente è riportato una parte del sistema di misura, sulla destra si ha la scheda madre che stimola il dispositivo sotto test e misura la risposta, sulla sinistra si ha il sistema sotto misura mentre al centro si inserisce la scheda di espansione EV-ADuCM350 BIO3Z che permette la trasmissione dei segnali e che fornisce ai pin RCAL1 e RCAL2 la resistenza di riferimento utile alla calibrazione.



Figura 11.5. Scheda EV-ADuCM350 BIO3Z, espansione di input/output

Nella seguente immagine invece è riportata l'espansione USB-SW/UART-EMUZ.



Figura 11.6. Scheda di espansione USB-SW/UART-EMUZ

Questa scheda, chiamata anche emulatore OB J-Link, connette la scheda principale e il computer, essa infatti viene connessa all'Eval-ADuCM350EBZ da un lato e al PC dall'altro, la connessione al computer avviene tramite il cavo USB - micro USB. Questa scheda, grazie al chip della Segger che è montato su di essa, permette di convertire i dati seriali ricevuti dalla scheda madre in dati condivisibili tramite protocollo USB al computer e viceversa. Questa estensione serve anche per caricare il codice programmato sulla scheda madre e per fornire l'alimentazione necessaria alla scheda per funzionare.

## 11.3 Definizione e programmazione del sistema di misura

Per iniziare la programmazione della scheda ho prima scaricato il software IAR, come ambiente di sviluppo e debug del codice.

Ho poi proceduto a sviluppare il codice in tre passi successivi, prima di tutto ho programmato il microcontrollore per l'acquisizione delle misure di impedenza a 4 terminali, ho poi temporizzato l'acquisizione delle misure e in fine ho programmato la scheda in modo da fargli comunicare i dati acquisiti al computer tramite il protocollo di comunicazione seriale UART.

#### 11.3.1 Misura d'impedenza a 4 terminali

Prima di parlare del codice scritto per la misura d'impedenza descriverò a livello funzionale come si effettua la misura di impedenza a 4 punti utilizzando la scheda Eval-ADuCM350EBZ e l'estensione EV-ADuCM350 BIO3Z, parlando anche delle calibrazioni necessarie alla scheda per effettuare misure d'impedenza precise e accurate anche al variare della temperatura e con l'invecchiamento del sistema di misura. Parlerò inoltre del sequencer, il blocco utile a controllare la parte analogica di front end, necessaria per effettuare la misura d'impedenza. Solo a questo punto spiegherò come ho programmato il microcontrollore.

#### Come viene effettuata la misura d'impedenza con la scheda ADuCM350EBZ

La seguente figura è lo schema a blocchi completo per la misurazione d'impedenza. Ad esso farò riferimento nelle sezioni successive per spiegare la misurazione d'impedenza a 4 punti.



Figura 11.7. Schema a blocchi dell'Analog Front End (AFE)

#### STADIO DI STIMOLO

Con stadio di stimolo intendo i blocchi presenti nel riquadro arancione della seguente immagine.



Figura 11.8. Stadio di stimolo dell'Analog Front End (AFE)

Questi moduli servono per stimolare il dispositivo sotto misura con un determinato segnale, con voluta ampiezza e frequenza. In particolare si può stimolare il dispositivo con un' onda trapezoidale, sinusoidale o creare una forma d'onda (da se) non standard. Quest'onda generata a livello digitale verrà poi convertita in segnale analogico grazie ad un DAC a 12 bit, filtrata e volendo attenuata. A questo punto entrerà in un amplificatore, chiamato anche loop di stimolo, che imposterà l'ampiezza del segnale pari al doppio della tensione differenziale misurata tra i nodi P e N.

Nella seguente immagine mostro uno zoom del loop di stimolo. Esso è composto da un ha un amplificatore da strumentazione con guadagno pari a due, questo guadagno è stato ottenuto grazie alle resistenze R1B e R1A, infatti settando il rapporto  $\frac{R1B}{R1A} = 2$  si ottiene un'amplificazione pari a 2.



Figura 11.9. Schema a blocchi del loop di stimolo del blocco AFE, nella configurazione di misura a 4 fili

#### Calibrazione DAC e loop di stimolo

Per ottenere misure precise e accurate il DAC deve essere calibrato ogni volta che viene utilizzato l'AFE. Questo viene fatto tramite una routine di taratura che si basa sulla resistenza di calibrazione  $R_{CAL}$  presente sulla scheda EV-ADuCM350 BIO3Z, questa resistenza ha una tolleranza molto bassa, del 0.1%, ed è per questo viene utilizzata come riferimento.

Questa routine misura l'errore di offset e di guadagno del DAC quando esso è impostato in condizioni note, cioè quando misura la resistenza  $R_{CAL}$ , e lo corregge tramite il blocco "gain and offset cal" dell'immagine 11.8. Le routine di auto-calibrazione cambia se il segnale di stimolo viene attenuato o meno dal blocco "ATTEN" dell'immagine 11.8, quindi bisogna utilizzare una delle due routine possibili in base a se si è impostata una attenuazione o meno del segnale. In ogni caso questa routine di auto-calibrazione deve essere effettuata dopo la taratura dell'ADC, che vedremo nella sezione successiva, perché la funzione di auto-taratura del DAC utilizza lo stadio di misura, e quindi ha bisogno che non ci siano errori dovuti ad esso.

#### STADIO DI MISURA

Lo stadio di misura comprende tutti i blocchi all'interno del riquadro verde della della seguente immagine.



Figura 11.10. Stadio di misura dell'Analog Front End (AFE)

Questi blocchi a partire dalla corrente indotta tra il nodo D e T ottengono il valore dell'impedenza incognita sotto forma di numero complesso.

In particolare il primo blocco è un amplificatore a transimpedenza che grazie alla resistenza esterna  $R_{TIA}$ , presente sulla scheda EV-ADuCM350 BIO3Z, converte la corrente in tensione. Poi il segnale viene attenuato e filtrato, e solo allora viene convertito, grazie a un ADC a 16 bit, in un segnale digitale. Questo segnale viene infine sottoposto alla trasformata di Fourier discreta, che lo converte in un numero complesso, fatto quindi di parte reale e immaginaria. Infine il processore utilizza le due componenti complesse per calcolare il modulo e la fase dell'impedenza misurata.

In particolare il modulo viene calcolato secondo la seguente formula:

$$magnitude\_z = \sqrt{Z_{IM}^2 + Z_{RE}^2} \tag{11.1}$$

mentre la fase viene calcolata come segue:

$$phase\_z = arcatan(x) \qquad con \quad x = \frac{Z_{IM}}{Z_{RE}}$$
(11.2)

utilizzando l'approssimazione dell'arctangente mostrata nell'equazione 11.3:

$$arctan(x) = 0.318253 \cdot x + 0.003314 \cdot x^{2} - 0.130908 \cdot x^{3}$$
(11.3)  
+0.068542 \cdot x^{4} - 0.009159 \cdot x^{5}

#### Calibrazione ADC e amplificatore a transimpedenza

Come spiegato prima per il DAC, anche l'ADC e l'amplificatore a transimpedenza devono essere tarati per effettuare misure precise e accurate.

L'errore di guadagno viene calcolato misurando la nota resistenza  $R_{CAL}$ , come mostarto nel seguente schema di principio.



Figura 11.11. Misura errore di guadagno amplificatore a transimpedenza, diagramma semplificato

L'errore di offset invece viene calcolato imposta in ingresso all'amplificatore a transimpedenza una corrente nulla, come mostrato in figura 11.12.



Figura 11.12. Misura errore di offset amplificatore a transimpedenza, diagramma semplificato

Entrambi gli errori misurati vengono corretti dal processore agendo sul blocco "gain and offset cal" dello stadio di misura, mostrato in figura 11.10.

#### Calibrazione di modulo e fase misurati

Infine anche i valori di fase e modulo ottenuti alla fine del processo di misura tramite le formule 11.1 e 11.2 devono essere calibrati, essi infatti sono solo dei valori proporzionali al reale valore di modulo e fase del sistema sotto misura. Questa taratura viene fatta attraverso la nota resistenza  $R_{CAL}$ , infatti misurando questa resistenza e sapendone anche il valore effettivo tarmite una proporzione si può ottenere il valore corretto di modulo e fase dell'impedenza incognita. Questa calibrazione che va fatta per ogni misura implica che il sistema deve sempre effettuare la misurazione della reistenza di riferimento prima di misurare l'impedenza incognita.

In particolare il corretto valore del modulo dell'impedenza incognita si calcola come segue:

$$magnitude = \frac{magnitude\_rcal \cdot RCAL}{magnitude\_z}$$
(11.4)

Mentre viene utilizzata la seguente formula per ottenere l'esatto valore di fase:

$$phase = (phase\_z - phase\_rcal) \cdot 180 \tag{11.5}$$

#### MATRICE DEGLI SWITCH

Il blocco che invece viene chiamato "switch matrix" nella seguente immagine è mostrato nella sua interezza nella figura 11.14. Questa matrice è importante sapere com'è organizzata perché é un blocco programmabile dall'utente, e in base a come viene settato si creano dei collegamenti tra il blocco analogico di misura e i pin AFE esterni, presenti sulla scheda EV-ADuCM350 BIO3Z. Sapendo quindi com'è organizzata la matrice si saprà come collegare il dispositivo per la misurazione.



Figura 11.13. Matrice degli switch nell'Analog Front End (AFE)



Figura 11.14. Matrice degli switch per la misurazione dell'impedenza

La matrice degli switch è composta da 34 interruttori completamente configurabili. Dalla figura 11.14 si mostra che gli interruttori D collegano al nodo di stimolo, i P ed gli N portano all'ingresso differenziale del loop di stimolo mentre gli interruttori T connettono al blocco di misura. Dall'immagine 11.13 viene mostrata invece l'altra faccia della medaglia, si vede in particolare che i pin AFE corrispondenti ai nodi D e T sono quelli che possono essere posizionati non strettamente a ridosso del dispositivo sotto misura, mentre i pin AFE corrispondenti ai nodi P ed N devo essere posizionati il più vicino possibile agli estremi del sistema da misurare.

Come si può osservare dall'immagine 11.14 la matrice degli switch possiede una configurazione che permette di collegarsi alla resistenza di rifermento  $R_{CAL}$ , presente sulla scheda EV-ADuCM350 BIO3Z. Questa configurazione si setta chiudendo gli interruttori: DR1, PR1, NR2 e TR2. Dunque nel momento della configurazione del sistema di misura questi specifici interruttori verranno chiusi. Questa possibilità di collegarsi alla resistenza di riferimento fa si che per stimolare l'impedenza incognita e per misurarne la tensione al nodo P si possono utilizzare solo i pin AFE da 2 a 8, chiudendo i corrispettivi interruttori D e P, e per misurare la tensione al nodo N e per acquisire la corrente, attraverso l'amplificatore a transimpedenza, si posso utilizzare solo i pin AFE da 1 a 7, chiudendo gli interruttori N e T associati.

#### Controllo dei blocchi Analogici e degli acceleratori del DSP

Ora che abbiamo visto come si effettua la misura d'impedenza a 4 punti e quali blocchi vengono utilizzati vi spiegherò come andare a configurare le impostazioni volute.

Dalla seguente immagine si può notare che il processore, in questo caso un Arm Cortex-M3, può controllare i blocchi analogici (come DAC e ADC) e gli acceleratori del DSP (come il generatore dell'onda di stimolo, il blocco per effettuare la trasformata di Fourier discreta e i filtri) attraverso la Memory Mapped Register(MMR).



Figura 11.15. Schema a blocchi del modulo di Analog Front End(AFE) e della sua comunicazionen con il processore

Questa memoria può essere letta o scritta in due modi, o direttamente dal processore tramite il bus di sistema oppure indirettamente tramite il sequencer. Nel nostro caso abbiamo programmato il sequecer per salvare in memoria le impostazioni desiderate per la misura d'impedenza e per temporizzare questo processo.

In particolare l'AFE sequencer è un blocco che legge i comandi dalla FIFO dei comandi, come si può vedere nell'immagine 11.15, e li esegue in modo sequenziale. I tipi di comandi che può ricevere sono due: attendi per un certo tempo o scrivi un comando nel MMR. I due tipi di comando si distinguono dal bit più significativo, esso infatti vale 0 in caso si tratta di un'attesa mentre vale 1 nel caso l'istruzione che ha letto nella FIFO dei comandi deve essere caricata nella memoria MMR.

Inoltre tutto il blocco di Analog Front End, compreso il sequencer, usa il clock chiamato ACLK che è progettato per avere la frequenza di 16 MHz.

#### Programmazione

Passerò ora a mostrare com'è stato programmata la scheda fino a qui. La scheda in particolare doveva, per ognuna delle frequenze nel range 100 Hz - 70 KHz con passo logaritmico, stimolare il dispositivo sotto test, ottenere, a seguito del blocco di misura, la parte reale e immaginaria dell'impedenza misurata, per infine elaborare queste due componenti con l'obbiettivo di ottenere il valore di modulo e fase del sistema sotto analisi.

Nell'immagine seguente 11.16 mostro il diagramma di flusso del programma scritto.



Figura 11.16. Diagramma di flusso della programmazione della scheda ADuCM350 con focus sulla misura d'impedenza

I blocchi evidenziati in giallo sono quelli riguardanti il sequencer e quindi i comandi utili a misurare l'impedenza.

Il sequencer, come si può vedere dal diagramma di flusso, viene innanzitutto definito fuori dal main, prima che il programma inizi, ma aggiornato del valore di frequenza e ampiezza del segnale di stimolo ad ogni giro. Una volta aggiornato di questi due parametri il blocco viene eseguito. Le istruzioni al suo interno dunque vengono processate in modo sequenziale, pilotando i moduli all'interno dell'Analog Front End e permettendo la misurazione dell'impedenza.

Come ho programmato il sequencer per la misura di impedenza a 4 terminali è mostrato di seguito:

```
uint32_t seq_afe_acmeas4wire[] = {
   0x001D0043, /* Safety word: bits 31:16 = command count, bits 7:0 = CRC */
   /*Impostazioni stadio di stimolo*/
   Ox8A000034, /* AFE_WG_CFG: TYPE_SEL = 10 */
   0x98000000, /* AFE_WG_CFG: SINE_FCW = 0 (placeholder, user programmable) */
   0x9E000000, /* AFE_WG_AMPLITUDE: SINE_AMPLITUDE = 0 (placeholder, user
       programmable) */
   Ox88000F01, /* AFE_DAC_CFG: DAC_ATTEN_EN = 1 */
   /*Impostazioni stadio di misura*/
   OxA0000002, /* AFE_ADC_CFG: MUX_SEL = 00010, GAIN_OFFS_SEL = 00 */
   Ox84005818, /* AFE_FIFO_CFG: DATA_FIFO_SOURCE_SEL = 10 */
   /* RCAL */
   0x86008811, /* DMUX_STATE = 1, PMUX_STATE = 1, NMUX_STATE = 8, TMUX_STATE
       = 8 */
   0x00000640, /* Wait 100us */
   Ox80024EF0, /* AFE_CFG: WAVEGEN_EN = 1 */
   0x00000C80, /* Wait 200us */
   Ox8002CFF0, /* AFE_CFG: ADC_CONV_EN = 1, DFT_EN = 1 */
   0x00032340, /* Wait 13ms */
   Ox80024EF0, /* AFE_CFG: ADC_CONV_EN = 0, DFT_EN = 0 */
   /* AFE2 - AFE8: stimulate the circuit, AFE4 - AFE6: mesure the differencial
       voltage*/
   0x86002468, /*DMUX_STATE = 8, PMUX_STATE = 6, NMUX_STATE = 4, TMUX_STATE =
       2 */
   0x00000640, /* Wait 100us */
   Ox8002CFF0, /* AFE_CFG: ADC_CONV_EN = 1, DFT_EN = 1 */
   0x00032340, /* Wait 13ms */
   Ox80024EF0, /* AFE_CFG: WAVEGEN_EN = 0, AFE_CFG: ADC_CONV_EN = 0, DFT_EN =
       0 */
   Ox82000002, /* AFE_SEQ_CFG: SEQ_EN = 0 */
};
```

Per quanto riguarda i blocchi nello stadio di stimolo, ho impostato che la forma d'onda

generata in ingresso al DAC fosse una sinusoide, tramite il comando "TYPE\_SEL=10". Poi ho dichiarato i parametri di frequenza e ampiezza della sinusoide tramite i registri "SINE\_FCW" e "SINE\_AMPLITUDE" <sup>1</sup>. Ed infine ho impostato l'amplificatore a guadagno programmabile (PGA) in modo che attenuasse il segnale in uscita dal DAC, con un guadagno pari a -0.025. Il comando utilizzato per questa impostazione è stato DAC\_ATTEN\_EN = 1.

Per quanto riguarda invece lo stadio di misura ho impostato il multiplexer precedente all'ADC in modo che selezionasse il segnale proveniente dall'amplificatore a transimpedenza, questo attraverso il comando "MUX\_SEL = 00010". Ho poi settato un fattore di correzione di offset e guadagno a seguito dell'ADC, volto a correggere gli errori dell'amplificatore a transimpedenza e dell'ADC, calcolati dalla funzione di auto-calibrazione. Questo è stato fatto tramite il comando "GAIN\_OFFS\_SEL = 00". Infine con il comando "DATA\_FIFO\_SOURCE\_SEL=10" ho selezionato che l'ingresso della "data FIFO" fosse l'uscita dalla DFT, quindi i dati già divisi in parte reale e immaginaria.

Ho poi inserite nel sequencer le impostazioni per misurare la resistenza di riferimento  $R_{CAL}$ , misura utile per calibrare le misure successive di impedenza incognita. Per effettuare la misura di  $R_{CAL}$  ho prima di tutto collegato la resistenza al blocco di stimolo e misura, questo chiudendo i seguenti interruttori della matrice degli switch <sup>2</sup>: DMUX\_STATE = 1, PMUX\_STATE = 1, NMUX\_STATE = 8, TMUX\_STATE = 8. Ho poi abilitato i vari moduli presenti all'interno dello stadio di stimolo e misura così da poter effettuare l'acquisizione. In particolare ho abilitato: il generatore d'onda con il comando "WAVE-GEN\_EN = 1", l'ADC con "ADC\_CONV\_EN = 1" e la DFT tramite "DFT\_EN = 1". Tra le varie abilitazioni inoltre ho inserito dei tempi di attesa in modo da aspettare che la configurazione fosse impostata correttamente. Infine, aspettati 13 ms dall'abilitazione dei blocchi di misura, ho disabilitato l'ADC e il modulo DFT, dato che l'acquisizione della resistenza  $R_{CAL}$  era stata effettuata.

Infine ho inserito nel sequencer i comandi per misurare l'impedenza incognita. La procedura utilizzata è stata identica a quella impiegata per la misura della resistenza di riferimento. Ovviamente sono stati chiusi altri interruttori della matrice degli switch per collegare il sistema di misura all'impedenza incognita<sup>3</sup> e non al riferimento.

Conclusa la misura dell'impedenza incognita ho disabilitato anche il generatore di forme d'onda, "WAVEGEN\_EN = 0", e il sequencer tramite il comando "SEQ\_EN = 0".

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Il valore di ampiezza e frequenza verrà scritto nel sequencer ad ogni giro di loop del sistema di misura. Questo perché la frequenza della sinusoide cambia ad ogni giro, assumendo valori tra 100 Hz e 70 KHz con passo logaritmico.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Nella sezione 11.3.1 "MATRICE DEGLI SWITCH" viene spiegato come avviene il collegamento alla resistenza  $R_{CAL}$ , in particolare nella 11.14 viene mostrato.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>Ognuno dei 4 interruttori collega un preciso nodo del sistema di stimolo e misura ad un determinato pin AFE della scheda EV-ADuCM350 BIO3Z. Riferirsi alla sezione 11.3.1 "MATRICE DEGLI SWITCH" per maggiori informazioni.

Nel seguente codice invece mosto attraverso quali funzioni è possibile l'aggiornamento dei valori di frequenza e ampiezza nel sequencer.

```
/* Update FCW in the sequence */
seq_afe_acmeas4wire[3] = SEQ_MMR_WRITE(REG_AFE_AFE_WG_FCW, FCW);
/* Update sine amplitude in the sequence */
seq_afe_acmeas4wire[4] = SEQ_MMR_WRITE(REG_AFE_AFE_WG_AMPLITUDE,
        SINE_AMPLITUDE);
```

FCW e SINE\_AMPLITUDE rappresentano rispettivamente la nuova frequenza e la nuova ampiezza del segnale da generare.

Nel codice sottostante infine mostro attraverso quale funzione viene eseguito il blocco sequencer.

```
/* Perform the Impedance measurement */
if (adi_AFE_RunSequence(hDevice, seq_afe_acmeas4wire, (uint16_t*)dft_results,
        DFT_RESULTS_COUNT))
{
    FAIL("Impedance Measurement");
}
```

Il parametro d'ingresso  $seq\_afe\_acmeas4wire$  contiene le istruzioni inserite nel sequencer, il puntatore  $dft\_results$  invece è l'indirizzo in cui andare a salvare le parti reali e immaginarie calcolare nello stadio di misura mentre  $DFT\_RESULTS\_COUNT$  rappresenta la dimensione del vettore  $dft\_results$ . Questo parametro vale il doppio delle misure acquisite dal sequencer ad ogni giro, nel nostro caso misurando  $R_{CAL}$  e l'impedenza incognita questo valore assumerà il valore 4.

#### 11.3.2 Temporizzazione dell'acquisizione

Come dicevo nell'introduzione a questa sezione, per la programmazione del sistema di misura ho proceduto a passi successivi. Dopo aver quindi verificato che il sistema era in grado di stimolare il dispositivo sotto misura con segnali sinusoidali di frequenza compresa tra 100 Hz e 70 KHz e misurarne l'impedenza ho proceduto con l'inserimento di un timer per la temporizzazione delle acquisizioni. In particolare il nostro interesse era che la misura di impedenza fosse effettuata ogni 15 minuti.

Il timer utilizzato è uno dei tre identici timers per uso generale presenti sulla scheda. Questo timer è un contatore a 16 bit che può funzionare nella modalità di incremento o decremento del proprio valore. Esso inoltre può far riferimento a una delle quattro fonti di clock disponibili sulla scheda: PCLK, HFOSC, LFOSC e LFXTAL. Ogni segnale di clock inoltre può essere scalato utilizzando un prescaler di 16, 256 o 32768.

Il timer ha due modalità operative: free running mode e periodic mode. Nella prima il timer conta fino/ o parte a contare dal massimo valore assumibile dal contatore mentre nella seconda modalità il valore massimo del contatore viene stabilito in fase di programmazione caricando il valore desiderato nel registro GTPLD MMR.

Nella seguente immagine riporto il diagramma a blocchi del timer sopra spiegato.



Figura 11.17. Diagramma a blocchi del timer ad uso generale

#### Programmazione del timer nel nostro sistema di misura

In particolare per il nostro sistema ho utilizzato il timer 0 settato in modalità di decremento e periodic mode. Ho inoltre definito come clock di riferimento del contatore l'oscillatore esterno a 32 KHz LFXTAL, settato con un prescaler di 32768, così da decrementare il contatore ogni circa 1 secondo.

Nella seguente codice mostro le impostazioni del timer di cui ho appena parlato.

```
/*
* Timer setup for LFXTAL.
* Programming GPTO with LFXTAL as clock source
*/
ADI_GPT_RESULT_TYPE test_GPT0_Init(void) {
   ADI_GPT_RESULT_TYPE result = ADI_GPT_SUCCESS;
   /* Initialize timer 0 */
   if ((result = adi_GPT_Init(GPT_EVENT_DEVICE_ID, &hGPTO)) !=
       ADI_GPT_SUCCESS) {
       return result;
   }
   /* Set periodic mode */
   if ((result = adi_GPT_SetPeriodicMode(hGPT0, true, TEST_LFXTAL_TIMER_VAL))
       != ADI_GPT_SUCCESS) {
       return result;
   }
   /* Set LFXTAL as clock source */
   if ((result = adi_GPT_SetClockSelect(hGPT0, GPT_CLOCK_SOURCE)) !=
       ADI_GPT_SUCCESS) {
       return result;
   }
   /* Set prescaler value to 32768 */
   if ((result = adi_GPT_SetPrescaler(hGPT0, ADI_GPT_PRESCALER_32768)) !=
       ADI_GPT_SUCCESS) {
       return result;
   }
```

```
/* Select count down mode */
if ((result = adi_GPT_SetCountMode(hGPT0, ADI_GPT_COUNT_DOWN)) !=
    ADI_GPT_SUCCESS) {
    return result;
}
return result;
```

}

La costante *TEST\_LFXTAL\_TIMER\_VAL* che viene passata alla funzione che imposta il periodic mode è, in questo caso, il valore di partenza del contatore. Inoltre questo valore è quello da cui riparte il contatore ogni volta che decrementando arriva a 0. Il valore di quel parametro è 879 e viene ricavato dalla seguente equazione.

$$\frac{Prescaler}{f_{CLK}} \cdot TEST\_LFXTAL\_TIMER\_VAL = (15 \min \cdot 60 \text{ sec})$$

$$\downarrow$$

$$TEST\_LFXTAL\_TIMER\_VA = \frac{900 \cdot f_{CLK}}{Prescaler} = \frac{900s \cdot 32KHz}{32768} \simeq 879$$
(11.6)

#### 11.3.3 Trasmissione dei dati acquisiti tramite protocollo UART

L'ultimo passo di programmazione del sistema di misura è stato far si che trasmettesse i valori di modulo e fase calcolati al computer, tramite il protocollo seriale UART.

Questo protocollo impone un bit di inizio e supporta le seguenti opzioni: da 5 a 8 bit di dato, la possibilità di inserire il bit di parità, la possibilità di utilizzare 1 o 2 bit di fine e la possibilità di scegliere il baud rate con cui trasmettere e ricevere i dati.

#### Programmazione della UART nel nostro sistema di misura

Nel nostro sistema di misura si è configurata la comunicazione tramite il protocollo UART come mostrato nella seguente immagine.

La funzione *adi\_UART\_Init()* inizializza la UART con i valori di configurazione di default. Questi valgono:

- baud rate: 9600
- lunghezza dei bit di dato: 8
- bit di parità: nessuno
- bit di fine: 1

Queste impostazioni standard possono essere modificate andando a chiamare la specifica funzione di setting. Questo è stato fatto solo per il baud rate che da 9600 è stato settato a 115200. Infine la UART è stata abilitata.

Nella seguente figura invece mostro l'utilizzo della UART per trasmettere i dati di modulo e fase. Basta semplicemente trasmettere alla funzione  $adi\_UART\_BufTX()$  il puntatore al dato da trasmettere e la sua lunghezza.

```
/* Print to UART */
size = strlen(pBuffer);
adi_UART_BufTx(hUartDevice, pBuffer, &size);
```

#### 11.3.4 Diagramma di flusso completo del programma

Nella seguente immagine ho voluto mostrare il flusso del programma, completo della parte di misura, di temporizzazione e trasmissione dei dati tramite protocollo UART. Per rendere più leggibile il diagramma di flusso ho diviso ho diviso queste tre parti del sistema per colore, rispettivamente arancione, verde e rosa.



Figura 11.18. Diagramma di flusso della programmazione della scheda ADuCM350. Completa di: misura d'impedenza, temporizzazione e trasmissione attraverso UART.
### 11.4 Script Python per il salvataggio dei dati seriali acquisiti

Una volta completata la fase di programmazione della scheda, ho creato uno script in Python per il salvataggio e la formattazione dei valori di modulo e fase trasmessi dalla scheda ADuCM350.

Il funzionamento del programma è mostrato nel diagramma di flusso 11.19.



Figura 11.19. Diagramma di flusso dello script Python per il salvataggio dei dati

Questo codice è stato scritto con l'obbiettivo di salvare i dati nello stesso formato utilizzato per il salvataggio dei dati acquisiti dall'analizzatore d'impedenza Agilent 4295A. Il programma infatti non appena riceve il primo dato seriale imposta l'intestazione e salva il valore di modulo e fase ricevuto. A seguire poi per  $num\_freq - 1$  volte inserisce i successivi valori di modulo e fase ricevuti.  $num\_freq$  corrisponde al numero di frequenze con cui si stimola il dispositivo sotto misura. Lo script dopodiché non riceverà dati per 15 minuti, essendo che il sistema è stato programmato per acquisire dati ogni quarto d'ora, ma quando la porta seriale riceverà un nuovo dato inserirà una nuova intestazione e le nuove misure ricevute a seguito dei dati già presenti nel file.

#### 11.5 Collegamento della scheda, caricamento del programma e impostazioni

Ora che è stato spiegato come ho programmato la scheda ADuCM350 e come vengono salvati i valori d'impedenza trasmessi al computer vi mostrerò come ho collegato la scheda e settato le impostazioni necessarie per il corretto funzionamento del sistema.

Innanzitutto ho collegare alla scheda principale le due estensioni EV-ADuCM350 BIO3Z e USB-SW/UART-EMUZ. Attraverso la prima mi sono poi collegata al dispositivo sotto misura e attraverso la seconda mi sono collegata a una porta USB del computer. Il sistema così composto è mostrato nella seguente figura.



Figura 11.20. Collegamenti della scheda ADuCM350 per la misura d'impedenza

In particolare i pin AFE da 1 a 8 dell'estensione di input/output EV-ADuCM350 BIO3Z sono mostrati nella seguente immagine.



Figura 11.21. Posizione pin AFE sulla scheda di espansione EV-ADuCM350 BIO3Z

Considerando il codice con cui è stato programmato il sequencer 11.3.1 si deduce che per la misura dell'impedenza incognita lo stimolo avviene dal pin AFE8, la misura della tensione differenziale avviene tra i pin AFE6 e AFE4 e la misura di corrente avviene dal pin AFE2. Infatti nel sequencer prima di effettuare la misura sono stati chiusi gli interruttori D8, P6, N4 e  $T2^4$ .

Nella seguente figura riporto uno zoom dei collegamenti tra l'estensione EV-ADuCM350 BIO3Z e l'impedenza sotto misura, così da vedere meglio quali pin AFE sono stati utilizzati e come sono stai collegati per la misura d'impedenza.



Figura 11.22. Collegamenti tra scheda EV-ADuCM350 BIO3Z e impedenza sotto misura

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>Per chiarimenti sul collegamento tra i pins AFE e il sistema di stimolo e misura, attraverso gli interruttori D, P, N e T, rifarsi all'immagine 11.14 nella sezione 11.3.1"MATRICE DEGLI SWITCH".

Ora che il sistema è collegato correttamente bisogna caricare il programma, per la misura d'impedenza, sul microprocessore. Prima di premere sul pulsante "Download and Debug" presente nell'ambiente di sviluppo IAR, bisogna però impostare il microcontrollore in modo che comunichi direttamente con il computer, senza quindi appoggiarsi al software IAR. Per fare ciò bisogna seguire il percorso  $Project \rightarrow Options \rightarrow General \ Options \rightarrow Library Configuration$  e selezionare "Via SWO", che appunto è l'acronimo di Serial Wire Output. Nella seguente figura è mostrata la selezione che è necessario effettuare prima del download del programma sul microprocessore. Infine bisogna andare nella gestione dei dispositivi del

Library Opt	tions 2	MISRA-C:2004	MISRA-C:1998
Target	Output	Library Configuration	Library Options 1
Library		Departmention:	
Library.		Lestinguon.	an af the C/C
ivormai	~	runtime library. No locale in	nterface Clocale no
		file descriptor support, no r	multibytes in printf and
		scanf, and no hex floats in	i strtod.
Lonfiguration f	ile:		
\$100LKI1_D	IR\$\Inc\c\	ULIb_Config_Normal.h	
Enable thre	ad support	in library	
Library low-le	vel interfac	e implementation	CMSIS
None		etdout/etderr	
Contine			Use CMSIS
<ul> <li>Seminoster</li> </ul>	3		DSP library
O IAR breakp	point	Via SWO	
	Library Opt Target Library: Normal Configuration 1 STOOLKIT_D Enable thre Library low-le O None Semihoste IAR breakg	Library Options 2 Target Output Library: Normal Configuration file: STOOLKIT_DIRSVine\chi Enable thread support Library low-level interfac None Semihosted IAR breakpoint	Library Options 2     MISRAC:2004       Target     Output     Library Configuration       Library:     Description:       Nomal     Use the normal configuration       ile descriptor support, no locale in file descriptor support, no locale in file descriptor support, no locale in STOOLKIT_DIRS\nc\c\DLib_Config_Nomal.h       Enable thread support in library       Ubrary low-level interface implementation       O None     stdout/stderr       © Semihosted     Via semihosting       IAR breakpoint     Wia SWO

Figura 11.23. Impostazione che permettere la comunicazione diretta tra scheda ADuCM350 e computer

computer e identificare il nome della porta virtuale a cui si è collegata la scheda, questa porta presenterà il nome "JLink CDC UART Port". A questo punto bisognerà inserire il nome della porta nello script Python, per indicargli da quale porta seriale ricevere i dati, e cambiare le impostazioni di essa in modo da rispecchiare le configurazioni della UART settate nel programma caricato sul processore.

Nel nostro caso la scheda si è collegata alla porta COM11 e le impostazioni della porta settate sono quelle riportate nella seguente immagine.



Figura 11.24. Configurazione della porta virtuale del computer per la comunicazione seriale tramite UART

Ora che il sistema è collegato, il programma è stato caricato correttamente sul processore e lo script Python è stato aggiornato con la porta virtuale corretta basta solo più eseguire lo il programma Python e premere il pulsante di reset presente sulla scheda Eval-ADuCM350EBZ per iniziare le misurazioni d'impedenza.

#### 11.6 Validazione del sistema di misura

L'ultimo tassello, dopo aver ultimato il sistema di misura, è stato verificarne il corretto funzionamento. Ho quindi acquisito delle misure di impedenza sia con la scheda ADuCM350, sia con il multimetro da banco *BK Precision 891*[29] e grazie a uno script Python ho calcolato l'errore relativo del modulo e assoluto della fase misurata dal nostro sistema di misura, considerando come riferimento il multimetro.

Con entrambi gli strumenti ho misurato: una resistenza, una resistenza in parallelo a un condensatore e una resistenza in serie a un condensatore. Queste misure sono state effettuate stimolando il sistema con sinusoidi di frequenze comprese tra 100 Hz e 70 KHz, con passo logaritmico.

Ho poi elaborato i dati acquisiti attraverso uno script Python, chiamato "ValidationA-DuCM350.py". Grazie a questo programma ho messo a confronto i due strumenti a livello grafico. Ho dunque creato una figura con quattro grafici: il primo mette a confronto il modulo misurato con l'ADuCM350 con quello misurato dal multimetro da banco, il secondo mostra l'errore relativo della scheda rispetto al multimetro da banco, il terzo confronta la fase misurata da entrambi gli strumenti mentre l'ultimo mostra la differenza tra la fase misurata dal multimetro e quella misurata dall'ADuCM350. Per la fase ho calcolato l'errore assoluto e non relativo perché, a differenza del modulo, la fase può assumere anche il valore "zero gradi" e questo rende inapplicabile la formula per l'errore relativo.

Nel nel grafico dell'errore relativo del modulo sono presenti due bande rosse, esse indicano un errore relativo pari a  $\pm 2.5\%$ . Anche nel grafico dell'errore assoluto della fase sono presenti queste due bande, in quel caso però indicano  $\pm 2^{\circ}$  di errore assoluto.

I risultati ottenuti dalla misura dei seguenti tre circuito sono mostrati nei grafici 11.26, 11.27 e 11.28.



Figura 11.25. Schemi dei circuiti misurati per la validazione della scheda ADuCM350.



Validation of ADuCM350 with BK precision 891 Mesurment of 1.2 KΩ

Figura 11.26. Errore della scheda ADuCM350 sulla misura di una resistenza da  $1.2K\Omega$ 

Dal precedente grafico di validazione, nel caso di misura di una resistenza, si osserva che i segnali di modulo e fase misurati sotto i 200 Hz presentano disturbi consistenti, infatti sia l'errore del modulo che della fase di molti campioni nell'insieme di frequenze 100-200Hz fuoriescono dalle bande di errore ammesse, rispettivamente del  $\pm 2.5\%$  e di  $\pm 2^{\circ}$ . Tutte le acquisizioni fatte con segnali di stimolo di frequenza maggiore di 200 Hz invece hanno degli errori relativi e assoluti che rispettano largamente quelli richiesti (rispettivamente  $\pm 2.5\%$ e di  $\pm 2^{\circ}$ ).





Figura 11.27. Errore della scheda ADuCM350 sulla misura di una resistenza da  $1.2K\Omega$ in parallelo a un condensatore da 2.2 nF

I risultati della validazione, nel caso della misura di un filtro passa-basso, presentano anche loro dei disturbi sotto i 200 Hz, inoltre evidenziano una maggiore attenuazione del modulo, nelle frequenze successive al polo del filtro. Questa maggiore attenuazione fa si che si abbia un errore assoluto crescente dopo il polo del filtro. Per quanto invece riguarda la fase, tranne quattro valori spuri è perfettamente all'interno dei limiti di errore assoluto di  $\pm 2^{\circ}$ .



Validation of ADuCM350 with BK precision 891 Mesurment of  $1.2 \text{ K}\Omega$  in series with 47 nF

Figura 11.28. Errore della scheda ADuCM350 sulla misura di una resistenza da  $1.2K\Omega$ in serie a un condensatore da 47 nF

I risultati della validazione, per la misura di un filtro passa alto, evidenziano invece un modulo maggiore alle basse frequenze, prima dello zero del filtro, che causa un errore assoluto del modulo fuoriesce dalla fascia desiderata del  $\pm 2.5\%$ . A basse frequenze si vede che anche la fase ha un valore maggiore della fase di riferimento, e infatti nonostante è dentro la fascia di errore  $\pm 2^{\circ}$  è comunque al limite dell'errore pari a  $2^{\circ}$ . In conclusione si può dire che il sistema è affidabile, con una un errore relativo del modulo minore del  $\pm 2.5\%$  e un errore assoluto della fase minore di  $\pm 2^{\circ}$  solo per le misure di resistenze, a patto che la frequenza di stimolo sia superiore a 200 Hz. Per la misura invece di impedenze complesse il sistema presenta degli errori fuori dai limiti consentiti, si è osservato però che l'andamento di questi errori è ben definito, si suppone quindi che modificando i parametri del sistema di misura questi errori si possano correggere.

# Capitolo 12 Conlusioni

Concludendo posso dire che si sono osservati i risultati attesi di relazione tra l'impedenza e la condizione di idratazione della pianta. Sia il picco di calore giornaliero, relazionato all'evaporazione fogliare, sia lo stress da carenza idrica e da eccesso idrico infatti, hanno mostrato un riscontro marcato nelle variazioni di modulo e fase. I risultati rappresentano però solo un primo passo nella ricerca in questo campo, servono infatti più acquisizioni per poter creare un modello affidabile di previsione dello stato idrico della pianta, e necessitano ancor più osservazioni e piante analizzate per poter generalizzare le previsioni ad un'intera categoria di piante.

Da ciò che si è osservato, dai positivi risultati statistici ottenuti e dagli altri studi riportati in letteratura a riguardo dell'utilizzo della spettroscopia sugli esseri viventi vegetali si può però dire che il monitoraggio dell'impedenza è un ottimo metodo per ottenere informazioni sulla salute della pianta perché diretto, non invasivo e utilizzabile per molte indagini diverse, tra cui: l'individuazione tempestiva di malattie, l'identificazione di carenze di specifici nutrienti nel terreno e la quantificazione della corretta dose di acqua da utilizzare nell'irrigazione.

## Bibliografia

- [1] "Xilema", Wikipedia, https://it.wikipedia.org/wiki/Xilema. Disponibile qui.
- [2] "Floema", Wikipedia, https://it.wikipedia.org/wiki/Floema. Disponibile qui.
- [3] "HDC2080 Low-Power Humidity and Temperature Digital Sensor", Texas Instruments. Disponibile qui.
- [4] "OPT3001 Ambient Light Sensor", Texas Instruments. Disponibile qui.
- [5] "WATERMARK Soil Moisture Sensors", IRROMETER. Disponibile qui.
- [6] "Raspberry Pi Zero W", Raspberry. Disponibile qui.
- [7] "Agilent 4294A Precision Impedance Analyzer", Agilent Technologies. Disponibile qui.
- [8] "BNC analog signal multiplexer", hasseb. Disponibile qui.
- [9] "Raspberry Pi 4", Raspberry. Disponibile qui.
- [10] Pething R, Kell DB, "The passive electrical properties of biological systems. Their significance in physics, biophysics and biotechnology.", Phys Med Biol, 32:933–970, (1987). Disponibile qui.
- [11] Jócsák I, Droppa M, Horváth G, Bóka K, Vozáry E (2010), "Detection of the effect of cadmium and flooding induced anoxia stresses by electrical impedance measurement in pea (Pisum sativum L.) roots.", Zeitschrift für Naturforsch C., Volume 65: Issue 1-2, 95–102, (2010), https://doi.org/10.1515/znc-2010-1-216. Disponibile qui.
- [12] Jamaludin D, Aziz SA, Ahmad D, Jaafar HZE, "Impedance analysis of Labisia pumila plant water status.", Information Processing in Agriculture, Volume 2, Issues 3–4, Pages 161-168, (2015), https://doi.org/10.1016/j.inpa.2015.07.004. Disponibile qui.
- [13] Cseresnyés I, Rajkai K, Takács T, Vozáry E, "Electrical impedance phase angle as an indicator of plant root stress.", Biosystems Engineering, 169:226–232, (2018), https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.03.004. Disponibile qui.
- [14] Repo T, Korhonen A, Laukkanen M, Lehto T, Silvennoinen R, "Detecting mycorrhizal colonisation in Scots pine roots using electrical impedance spectra.", Biosystems Engineering, 121:139–149, (2018), https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.02.014. Disponibile qui.
- [15] Meiqing L, Jinyang L, Hanping M, Yanyou W, "Diagnosis and detection of phosphorus nutrition level for Solanum lycopersicum based on electrical impedance spectroscopy.", Biosystems Engineering, 143:108–118, (2016), https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.01.005. Disponibile qui.
- [16] Jinyang L, Meiqing L, Hanping M, Wenjing Z, "Diagnosis of potassium nutrition level in Solanum lycopersicum based on electrical impedance." oi.org/10.1007/s40626-019-00152-y . Disponibile qui.

- [17] G. Xu, F. Zhang, S.G. Shah, Y. Ye, H. Mao,"Use of leaf color images to identify nitrogen and potassium deficient tomatoes, Pattern Recognition Letters", Volume 32(11), 2011, 1584-1590.
- [18] S West Jonathan, Cedric Bravo, Roberto Oberti, Dimitri Lemaire, Dimitrios Moshou, H Alastair McCartney,"The potential of optical canopy measurement for targeted control of field crop diseases", Annual review of Phytopathology, vol. 41, no. 1, pp. 593-614, 2003.
- [19] H. Durmus, E. O. G"unes, and M. Kırcı, "Data acquisition from greenhouses by using autonomous mobile robot", 2016 5th International Conference on Agro-Geoinformatics, Tianjin, 2016, pp. 1-5.
- [20] Richard S Hunter, "Photoelectric color difference meter", Josa, vol. 48, no. 12, pp. 985-995, 1958.
- [21] Li C, Wang P, MenziesNW, Lombi E and Kopittke PM2018 Effects of methyl jasmonate on plant growth and leaf properties J. Plant Nutr. Soil Sci. 181 409–18.
- [22] Napole~ao TA, Soares G, VitalCE, Bastos C, Castro R, Loureiro ME and Giordano A 2017 Methyl jasmonate and salicylic acid are able to modify cell wall but only salicylic acid alters biomass digestibility in the Model Grass Brachypodium Distachyon. Plant Sci 263 46-54.
- [23] Direct Electrochemical Determination of Methyl Jasmonate in Wheat Spikelet at a Nano-Montmorillonite Film Modified Electrode by Derivative Square Wave Voltammetry, Tian Gan, Chengguo Hu, Zilin Chen, and Shengshui Hu, Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010 58 (16), 8942-8947, DOI: 10.1021/jf101531c.
- [24] Fabrication and application of a novel plant hormone sensor for the determination of methyl jasmonate based on self-assembling of phosphotungstic acid–graphene oxide nanohybrid on graphite electrode, Tian Gan, Chengguo Hu, Zilin Chen, Shengshui Hu, Sensors and Actuators B: Chemical, Volume 151, Issue 1, 2010, Pages 8-14, ISSN 0925-4005. Disponibile qui.
- [25] Larrieu, A., Champion, A., Legrand, J. et al. A fluorescent hormone biosensor reveals the dynamics of jasmonate signalling in plants. Nat Commun 6, 6043 (2015). Disponibile qui.
- [26] ,"The development and application of an electrical impedance spectroscopy measurement system for plant tissues", Computers and Electronics in Agriculture Volume 82, March 2012, Pages 96-99. Disponibile qui.
- [27] L. Bar-on, A. Jog and Y. Shacham-Diamand, "Four Point Probe Electrical Spectroscopy Based System for Plant Monitoring," IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), Sapporo, Japan, 2019, pp. 1-5.
- [28] "ADuCM350 Hardware Reference Manual", Analog Device. Disponibile qui.
- [29] "BK Precision model 891", B&K Precision. Disponibile qui.