

Corso di Laurea Magistrale
in
Ingegneria Informatica

IMSI 2022

Insulinmeter 2.0

PROGETTAZIONE FISICA

M63001155 Giovanni Olinò
M63001120 Francesco Papa

Prof. Pasquale Arpaia



Università degli Studi di Napoli "Federico II"

SCUOLA POLITECNICA DELLE SCIENZE DI BASE
Anno Accademico 2021/2022 Secondo Semestre

Indice

1	Dispositivo	3
1.1	Hardware	3
1.1.1	EVAL-ADICUP3029	4
1.1.2	AD5940	5
1.1.3	Z test Board	7
1.2	Architettura 4-Wire BIA	8
1.2.1	Precision AC Voltage Source	8
1.2.2	High Precision Current Meter	8
1.2.3	Precision Differential Voltage Meter	9
1.2.4	Current Limit Resistors	9
1.2.5	Isolation Capacitors	9
1.2.6	High Speed TIA Gain Resistor	9
1.2.7	Calculating Unknown Impedance	10
1.3	Comunicazione	10
1.3.1	Comunicazione Seriale	10
1.3.2	Comunicazione Bluetooth	10
2	Applicativo	14

Introduzione

Il seguente documento nasce per essere parte integrante dell'offerta tecnica presentata al Cliente.

Esso è strutturato in modo da dare una visione completa del progetto realizzato, soffermandosi sull'analisi fisica dei componenti che compongono il Sistema.

In una prima parte è descritto il *Dispositivo*, specificando ed analizzando ogni suo componente utilizzato ai fini del Progetto. Si prosegue con la descrizione dell'*Applicativo*, esplicitandone le caratteristiche più salienti.

Capitolo 1

Dispositivo



Figura 1.1: Evaluation Kit dell'Analog Device: *EVAL-AD5940BIOZ*

L'Analog Device fornisce un Evaluation Kit ad alta precisione e ultra low power in grado di misurare la risposta alla corrente, tensione ed impedenza, l'**EVAL-AD5940 BIOZ**, utilizzata per la realizzazione del Sistema come riportato in *Condizioni Realizzative - Cap 1.3 "Documento di Analisi dei requisiti"*.

1.1 Hardware

L'Evaluation Kit è composto da: l'EVAL-ADICUP3029 (*host board*) che gestisce e pilota l'AD5940 (*guest board*) in cui sono presenti tutte le componenti necessarie ad una corretta e precisa misurazione della spettroscopia di bioimpedenza, l'AD5940 Z Test capace di modellare un vasto range di impedenze del corpo, e gli elettrodi.

1.1.1 EVAL-ADICUP3029



Figura 1.2: EVAL-ADICUP3029 Board

L'EVAL-ADCUP3029 è un ultra low power microcontroller system che integra sistemi di controllo, processo e connettività. L' MCU è basato sul processore ARM Cortex-M3 e comprende periferiche digitali (SPI, UART, BLE . . .), embedded SRAM, memoria flash ed un sistema analog-to-digital converter (ADC).

Tale board rappresenta l'*Host* dell'Evaluation Kit. In primo luogo interpreta e opera sui valori di tensione e corrente acquisiti attraverso la *Guest Board* con la quale comunica tramite protocollo SPI (realizzato mediante gli Arduino Uno Connectors di SPI1). In secondo luogo si occupa del trasferimento dei dati all'Applicativo mediante l'utilizzo di comunicazione seriale, realizzata dalla UART virtualizzata sul connettore micro-USB, e comunicazione Bluetooth Low Energy, resa possibile dalla presenza sulla stessa del chip EM9304 (collegato all'MCU tramite SPI2).

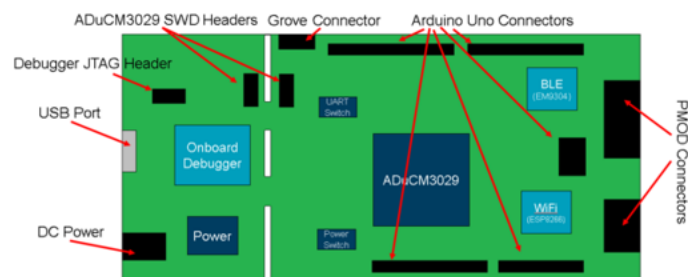


Figura 1.3: High level schematic of EVAL-ADICUP3029

1.1.2 AD5940

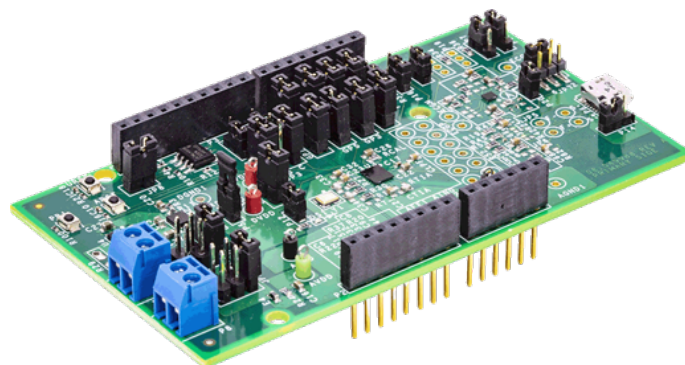


Figura 1.4: AD5940 Board

L'AD5940 è una board low power e ad alta precisione, progettata per applicazioni portatili basate su tecniche di misura elettrochimiche come quelle amperometriche, di tensione e d'impedenza. In particolare, grazie all'AFE AD8233 si possono implementare sistemi completi di misura bioelettrici e biopotenziali.

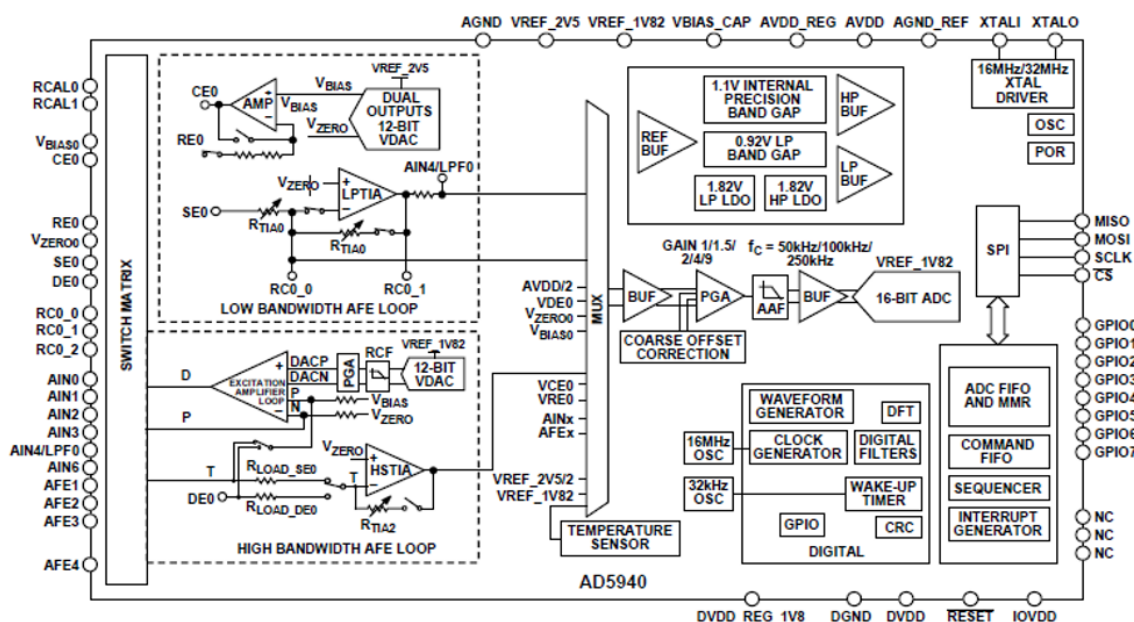


Figura 1.5: AD5940 Functional Block Diagram

Essa presenta due excitation loops con un canale di misura comune. Il primo loop consiste di un ultra low power, dual outputs string DAC ed un low power e low noise Potenziostato. Un output del ULDAC controlla l'input non inverting del potenziostato mentre l'altro si collega all'input noninverting dell'Amplificatore di Transimpedenza (TIA). Tale loop è capace di generare segnali dc fino a 200 Hz.

Il secondo loop consiste in un DAC 12-bit ad alta velocità capace di generare segnali con frequenza fino a 200 kHz.

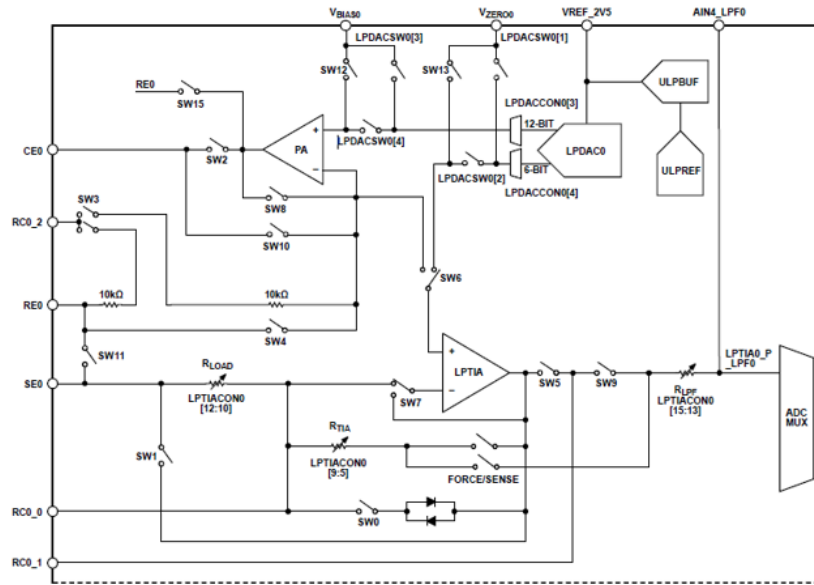


Figura 1.6: AD5940 Low Bandwidth Loop

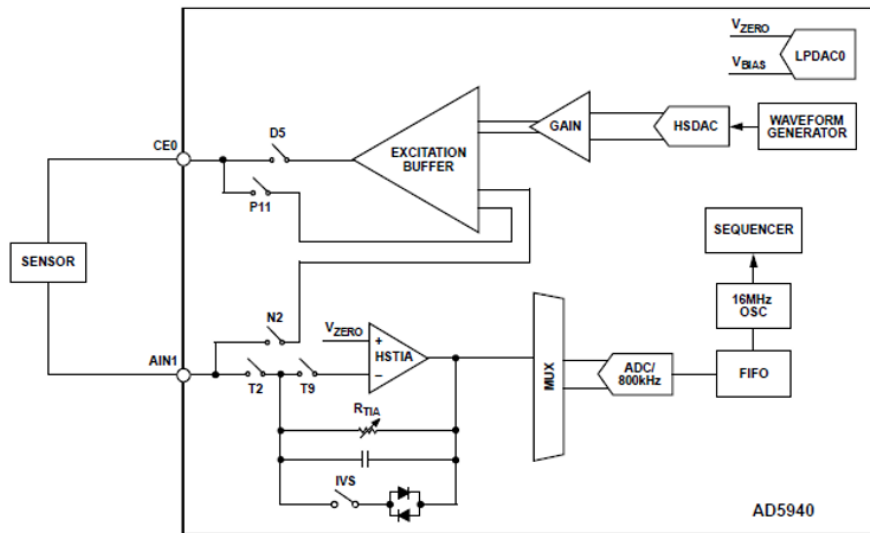


Figura 1.7: AD5940 High Bandwidth Loop

Il canale di misura è dotato di ADC con un registro di approssimazione (SAR) a 16 bit e 800 kSPS, un antialias filter e un amplificatore a guadagno programmabile (PGA). A monte dell'ADC è presente un multiplexer, con il quale è possibile selezionare gli input per il canale di misura. Tali input possono essere correnti esterne, voltaggi esterni, e segnali interni. Gli input di corrente provengono da due TIA con guadagno e resistori a carico programmabile: una low power per segnali a banda bassa, una high speed per segnali a banda fino a 200 kHz.

Una matrice di switch programmabile connette i sensori ai blocchi di misura. Inoltre, costituisce un'interfaccia per la connessione di un resistore di calibrazione esterno (R_{TIA}) e permette di multiplexare diversi dispositivi elettronici agli stessi elettrodi.

Le sorgenti di riferimento on-chip disponibili sono 1.82 V e 2.5 V.

I blocchi di misura della AD5940 board possono essere controllati attraverso registri diretti, accessibili tramite interfaccia SPI oppure tramite un sequencer programmabile che offre un controllo automatico dell'AFE. Quest'ultimo è dotato di 6 kB di SRAM partizionati per i comandi e per i dati, gestiti in maniera FIFO. Sono disponibili interruzioni che indicano quando la FIFO è piena o quando raggiunge condizioni preimpostate.

La board opera con un'alimentazione da 2.8 V a 3.6 V e in un intervallo di temperatura da -40°C a $+85^{\circ}\text{C}$.

1.1.3 Z test Board



Figura 1.8: Z-test Board

L' AD5940 Z test board è composta da una rete di Resistori, Capacitori e Switch specifici per testare e verificare le misure. Può modellare un vasto range di impedenze connettendosi al Kit tramite connettore USB.

1.2 Architettura 4-Wire BIA

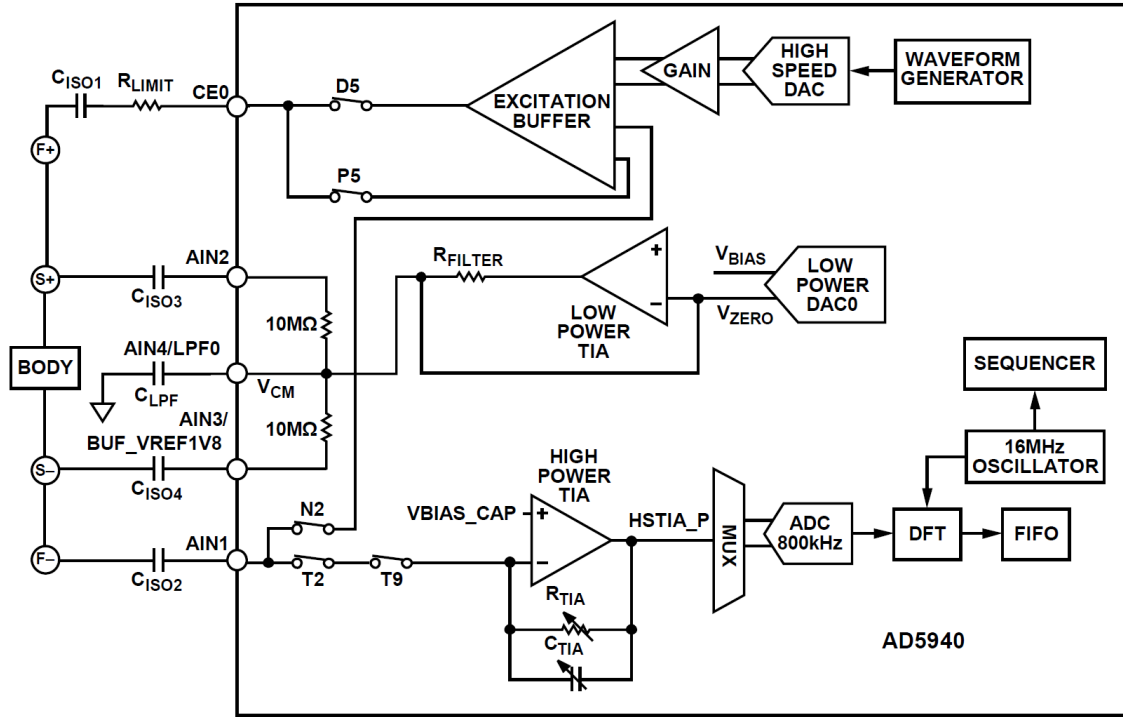


Figura 1.9: Bioimpedance Signal Path

L'approccio utilizzato ai fini del Progetto è stato quello del 4-Wire BIA, di seguito presentato.

Il calcolo della bioimpedenza necessita di una precisa sorgente di voltaggio ac, un amperometro ed un voltmetro differenziale ad alta precisione.

1.2.1 Precision AC Voltage Source

L'AD5940 utilizza un HSDAC (*high speed DAC*) ed un *Waveform Generator* per generare un preciso voltaggio ac. L'accuratezza del voltaggio è garantita da una configurazione di rilevamento differenziale interna, che connette *CE0* e *AIN1* di nuovo all'*Excitation Buffer*.

Lo switch *D5* della matrice programmabile connette l'output dell'*Excitation Loop* al pin *CE0* connesso all'elettrodo. L'input dell'*Excitation Buffer* proviene dal *Waveform Generator* passando per l'HSDAC a 12 bit ed un *excitation amplifier*.

1.2.2 High Precision Current Meter

L'AD5940 utilizza un *high speed, high precision TIA* per convertire la corrente proveniente da *AIN1* in un voltaggio misurato dall'ADC. Il canale del TIA misura la corrente di risposta ed è polarizzato con precisione dalla sorgente interna di 1.11 V.

A monte dell'ADC è presente un multiplexer, attraverso il quale si seleziona il segnale di input. Con *HSTIA_P* è selezionato l'output del HSTIA. L'ADC converte la corrente misurata con una velocità da 800 kHz a 1.6 MHz, per poi essere trasformata dal blocco DFT. Il numero di punti della Trasformata Discreta di Fourier è configurabile fino a 16 384. L'output della DFT consiste nella parte reale e immaginaria del contributo del segnale alla frequenza selezionata per il *Waveform Generator*.

1.2.3 Precision Differential Voltage Meter

L'AD5940 utilizza un *low power* DAC ed un *low power* TIA per settare una tensione di modo comune tra $AIN2$ e $AIN3/BUF_VREF1V8$ attraverso il pin $AIN4$.

L'uscita V_{BIAS} del *low power* DAC è indirizzata all'input positivo del TIA. Il DAC è configurato in modo da fornire un output di 1.1V. A valle del TIA è presente un carico R_{FILTER} . La tensione di modo comune è collegata al pin $AIN4$, che attraverso un capacitore connesso a terra (GND), crea un LPF (*low-pass filter*).

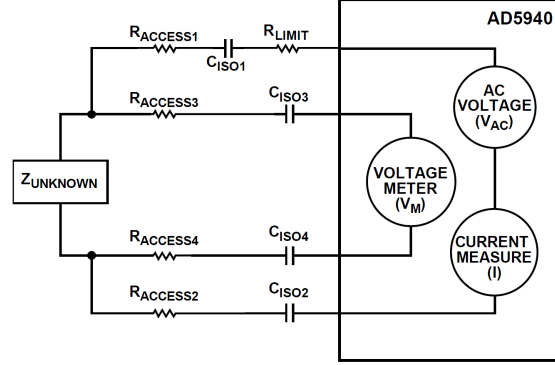


Figura 1.10: Wire Bioimpedance Topology

1.2.4 Current Limit Resistors

Lo standard IEC 60601 limita la corrente ac applicabile ad un corpo umano. La massima corrente ac applicabile a 50 kHz è 500 μA e a 60 kHz è di 600 μA . Per calcolare il valore di R_{LIMIT} si considera che la tensione massima in uscita dall'AD5940 è di 1.2 V p-p che corrisponde a 0.4243 V rms. Si considera un valore di corrente ac di circa l'80% di quella massima consentita, 400 μA rms.

$$R_{LIMIT} = \frac{0.4243 \text{ V rms}}{400 \mu A \text{ rms}} = 1060.66 \Omega$$

Nell'architettura, connesso al pin $CE0$ vi è un R_{LIMIT} di 1 k Ω .

1.2.5 Isolation Capacitors

Lo standard IEC 60601 limita la corrente dc applicabile ad un corpo umano, che è massimo 10 μA . In questo caso, la corrente dc è garantita essere zero, grazie alla presenza di capacitori di isolamento. Il Dispositivo presenta capacitori di 0.47 μF , capacità sufficientemente grande e di piccole dimensioni. C_{ISO1} , il capacitore di $CE0$ è di 15 nF.

1.2.6 High Speed TIA Gain Resistor

Per calcolare R_{TIA} , il resistore di guadagno per l'HSTIA, bisogna prima calcolare la sua impedenza minima e la sua massima corrente. Nell'equazione seguente $R_{ACCESS1_{MIN}}$ e $R_{ACCESS2_{MIN}}$ rappresentano le resistenze tra gli elettrodi e i capacitori di isolamento, che si assume essere zero.

$$Z_{MIN} = \sqrt{r^2 + i^2} = \sqrt{\frac{(R_{LIMIT} + R_{ACCESS1_{MIN}} + Z_{UNKNOWN_{MIN}} + R_{ACCESS2_{MIN}})^2}{+ (XC_{ISO1_{MIN}} + XC_{ISO2_{MIN}})^2}}$$

$Z_{UNKNOWN_{MIN}}$ è assunto essere 200 Ω .

$XC_{ISO1_{MIN}}$ e $XC_{ISO2_{MIN}}$ pari a 67.73 Ω a 50 kHz.

Risolvendo l'equazione Z_{MIN} è 1.2 k Ω . Si configura, allora il valore massimo di R_{TIA} , 1 k Ω .

1.2.7 Calculating Unknown Impedance

Il sequencer esegue i comandi automaticamente e riempie la *data FIFO* con la parte reale e immaginaria risultanti dal calcolo della DFT sia per la corrente misurata che per la tensione applicata.

Una volta ottenuti i dati di corrente e tensione (quattro valori), il sequencer interrompe l'ADCUP3029, che ne preleva i valori e ne calcola l'impedenza.

$$Measurement\ Magnitude = \sqrt{r^2 + i^2}$$

$$Measurement\ Phase = \tan \frac{-i}{r}$$

Per il calcolo dell'impedenza, si usa la legge di Ohm, dove risulta essere:

$$|Z_{UNKNOWN}| = \frac{Voltage\ Magnitude}{Current\ Magnitude} R_{TIA}$$

1.3 Comunicazione

Come esplicitato nel documento "*Progettazione Concettuale*" sono state implementate due modalità di comunicazione Dispositivo-Applicativo.

1.3.1 Comunicazione Seriale

La configurazione di tipo *wire* è affidata alla *UART* virtualizzata sul connettore USB dell'ADCUP3029. Per poterla utilizzare è stato necessario settare i pin P0_10 e P0_11 oltre a specificare il clock (1.6 MHz) e il baudrate (230400).

La ricezione è stata implementata tramite interruzioni esterne, abilitando la sorgente di Interrupt della *UART* nell'NVIC. L'Interrupt Handler realizzato, richiama un'apposita funzione progettata, che processa i byte ricevuti in modo da riconoscere eventuali parole chiave, che richiamano funzioni corrispondenti ben specifiche:

- **start** seguito da un parametro, permette di inizializzare ed eseguire la misura di Bioimpedenza a singola frequenza, impostata dal parametro;
- **start2** seguito da quattro parametri, permette di inizializzare ed eseguire la misura di Bioimpedenza a frequenza variabile; il primo parametro setta la frequenza iniziale, il secondo la frequenza finale, il terzo il numero di punti intermedi di frequenze da analizzare, il quarto il numero di cicli da eseguire;
- **stop**, permette di fermare la sessione di misurazione;
- **rst**, permette il reset del Dispositivo e l'inizializzazione completa del Firmware.

Per quanto riguarda l'invio dei dati sulla seriale, ad ogni interruzione del sequencer vengono mandati tre float, rappresentanti frequenza, modulo e fase della misura appena effettuata.

1.3.2 Comunicazione Bluetooth

Ci si sofferma maggiormente su questo tipo di comunicazione, in quanto sono stati riscontrati, durante la fase di progettazione e implementazione del Firmware, diverse problematiche.

Il Bluetooth low energy (BLE) è una tecnologia wireless sviluppata da SIG che permette di operare a basso consumo, sfruttando le frequenze non proprietarie da 2.4 a 2.485 GHz. Caratteristiche di rilevanza sono l'ampio spettro, il frequency hopping e il full-duplex signal. In particolare è stato creato con l'obiettivo di trasmettere pacchetti di dati leggeri consumando significativamente

meno energia rispetto ai dispositivi ad alta velocità.

Il Bluetooth low energy ha un'architettura di tipo stack che consiste di due componenti: *Controller*, *Host*. Il Controller include il *physical layer* e il *link layer*. L'Host comprende il *logical link control and adaptation protocol* (L2CAP), il *security manager* (SM), l'*attribute protocol* (ATT), il *generic attribute profile* (GATT) e il *Generic access profile* (GAP). L'interfaccia tra i due componenti è chiamata *controller interface* (HCI).

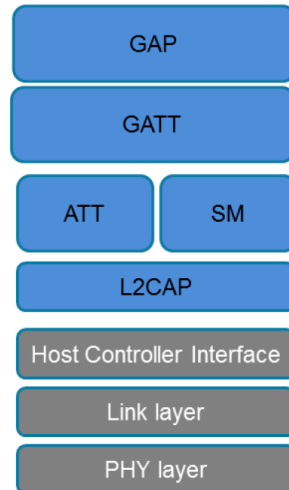


Figura 1.11: Bluetooth low energy stack architecture

Di seguito i principali.

Physical layer

Il Physical layer è costituito da una radio GFSK (*Adaptive frequency-hopping Gaussian frequency shift Keying*) ad 1 Mbps. Il sistema BLE usa 40 canali RF con 2 MHz di spazio, divisi in *Data channels* per la comunicazione bidirezionale tra i device connessi e *Advertising channels*, utilizzati per la scansione, la ricerca e il broadcasting. Il frequency hopping permette di passare da un canale disturbato ad un libero, tramite un algoritmo specifico.

Link layer

Il Link layer definisce come i due device possono utilizzare la radio per trasmettersi l'informazione, individuando una macchina a stati finiti: Scanning, Advertising, Standby, Initiating e Connection. I pacchetti scambiati hanno la seguente struttura.

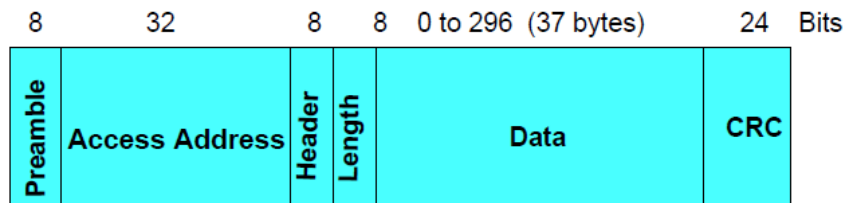


Figura 1.12: Bluetooth low energy stack architecture

La versione 4.2 estende il payload del pacchetto da 27 a 251 bytes.

Attribute protocol (ATT)

Questo protocollo permette di esporre i dati, conosciuti come attributi, agli altri device. Il device *server* fornisce i dati ai device *client* a lui connessi. Un attributo è un dato con i seguenti componenti:

- Attribute handle: è a 16 bit ed identifica un attributo su un server;
- Attribute type: definisce un identificatore univoco (UUID), che determina il significato dei dati;
- Attribute value: da 0 a 512 bytes;
- Attribute permissions: specificano il livello di sicurezza richiesto per accedere in *read* e/o *write*, *notification* e/o *indication*.

ATT definisce un set di metodi per trovare, leggere e scrivere attributi tra device. Implementa un *peer-to-peer client-server protocol* per la comunicazione.

Generic attribute profile (GATT)

Il GATT definisce un framework, per usare il protocollo ATT ed è usato per servizi, caratteristiche, ricerca dei descrittori, lettura, scrittura, *indication* e *notification* delle caratteristiche.

In una connessione tra due device, si definiscono due diversi ruoli: GATT client e GATT server. È possibile per un device essere contemporaneamente entrambi.

Gli attributi sono incapsulati in due tipi fondamentali: *Characteristics* e *Services*.

Characteristic attribute type

Una caratteristica è un tipo di attributo che contiene un singolo valore e un certo numero di descrittori che lo descrivono. Una caratteristica presenta il tipo di dato che il valore rappresenta, se quest'ultimo può essere letto/scritto o altre azioni e descrive cosa significa.

Una caratteristica è composta da: *Characteristic declaration*, *Characteristic value* e *Characteristic descriptor(s)*.

Service attribute type

Un servizio è una collezione di caratteristiche che operano insieme fornendo un servizio globale al profilo applicativo. Un servizio contiene un *service declaration* e può contenere definizioni e/o quelle delle caratteristiche.

Generic Access Profile (GAP)

Il sistema Bluetooth low energy definisce un profilo di base richiesto per ogni bluetooth device che specifica i requisiti necessari. In questo contesto, sono definiti due concetti:

- GAP modes: consente di configurare un device in un modo specifico per un lungo tempo. Esistono quattro modalità differenti: *broadcast*, *discoverable*, *connectable* e *bondable type*;
- GAP procedures: consente di configurare un device in un modo specifico per un tempo limitato. Esistono quattro tipi di procedure: *observer*, *discovery*, *connection* e *bonding procedures*.

Chip EM9304

Tornando al Dispositivo, sull'host board ADCUP3029 è disponibile il chip EM9304 Bluetooth low energy, connesso al microcontrollore tramite interfaccia SPI. I pin settati per la configurazione sono P1_02, P1_03 e P1_04 rispettivamente collegati con SPI2_CLK, SPI2_MISO e SPI2_MOSI. Per lo sviluppo del firmware relativo alla configurazione e inizializzazione del componente si è preso in considerazione la libreria BLE dell'Analog Device, nella quale sono forniti esempi di invio dati ad un'applicazione per android.

Per comprendere come utilizzare al meglio la libreria in nostro possesso, data la scarsità di documentazione e l'impossibilità di creare e configurare caratteristiche e servizi, è stato necessario reperire e decompilare l'applicazione android. Osservando il codice java di quest'ultima si è risaliti alla caratteristica di default fornita dal server (Dispositivo) sulla quale fare la *read* dall'Applicativo.

Per comprendere come effettuare una ricezione, invece, si è reso necessario scendere al livello più basso della libreria, dove, dopo un'attenta analisi si è trovato il puntatore all'area di memoria utilizzata per la scrittura dei dati in ricezione.

Una volta comprese le modalità di ricezione e trasmissione è stato possibile definire una funzione che acquisisce i dati in input analoga a quella implementata nella comunicazione seriale, richiamata dall'Handler fornito dalla libreria BLE.

Avendo la limitazione di inviare/ricevere un numero massimo di 20 byte alla volta si è definito un pacchetto avente 1 byte per l'Header e 15 byte per il carico (Payload), dovendo quindi codificare ogni float su quattro byte.

Capitolo 2

Applicativo

L'Applicativo come specificato nel documento "*Analisi dei Requisiti*" è stato sviluppato in Matlab, in particolare tramite Matlab App Designer.

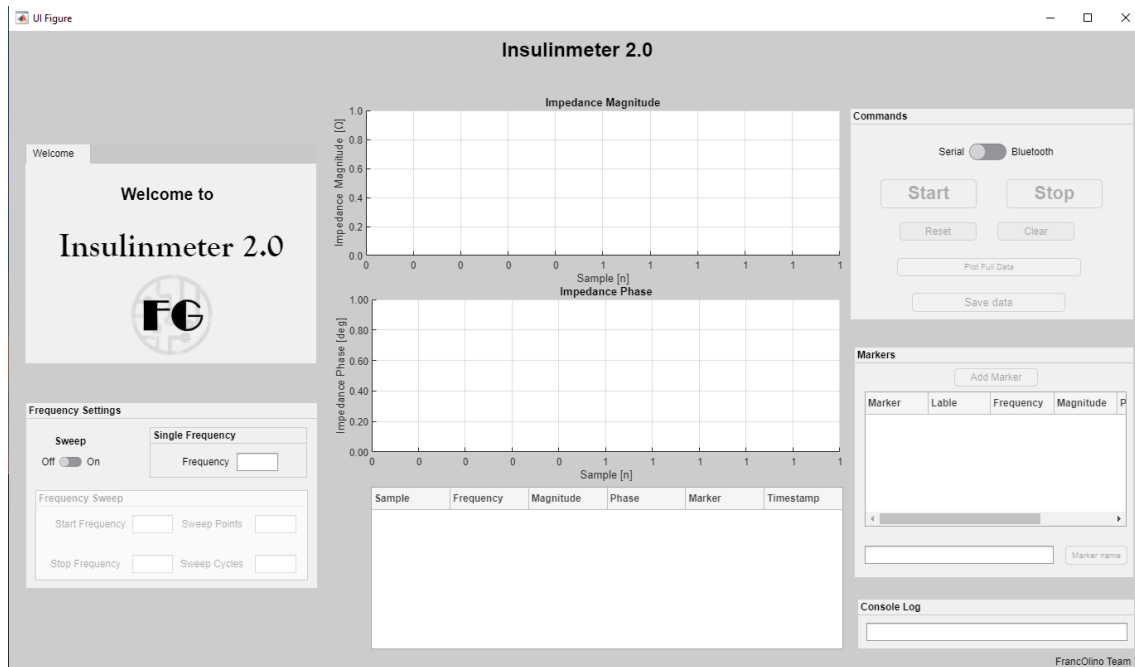


Figura 2.1: Visualization of the developed Application

Come indicato nel documento di "*Progettazione Concettuale*", l'Applicativo è stato suddiviso in due moduli principali:

- *Communication Module*;
- *Processing and data visualization module*.

Communication Module

Sono state previste due interfacce diverse per le due tipologie di comunicazione implementate: seriale e bluetooth.

In caso di comunicazione seriale è possibile selezionare la porta COM alla quale connettersi ed il baud rate. Una volta stabilita la connessione si può ricevere ed inviare dati.

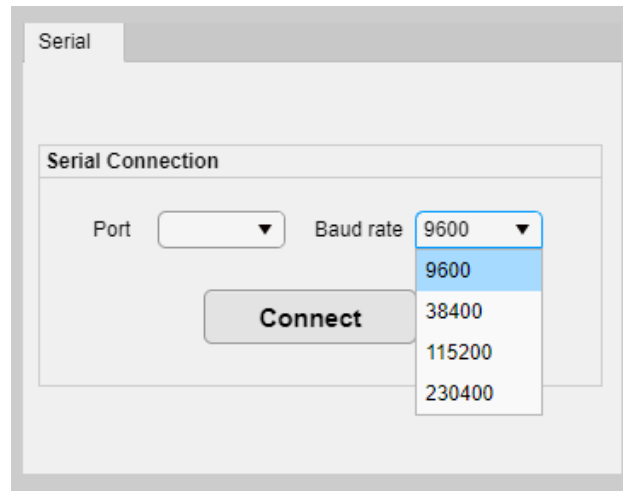


Figura 2.2: Serial connection panel

In caso di comunicazione bluetooth è possibile fare uno *scan* di tutti i device raggiungibili, selezionare il Dispositivo e connettersi ad esso. Durante la fase di connessione, l'Applicativo, si collega alle due caratteristiche offerte dal Dispositivo.

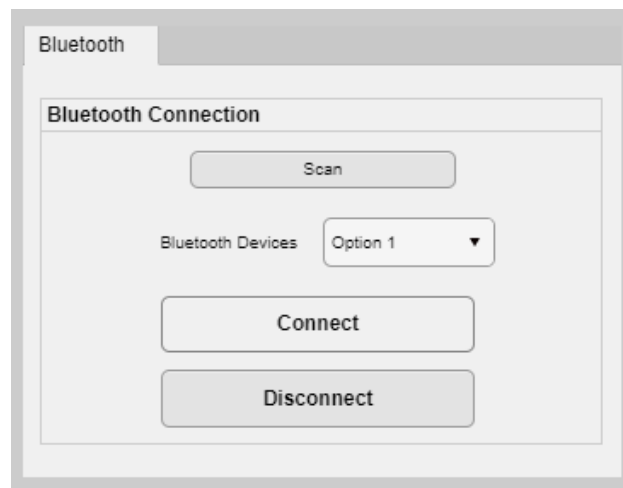
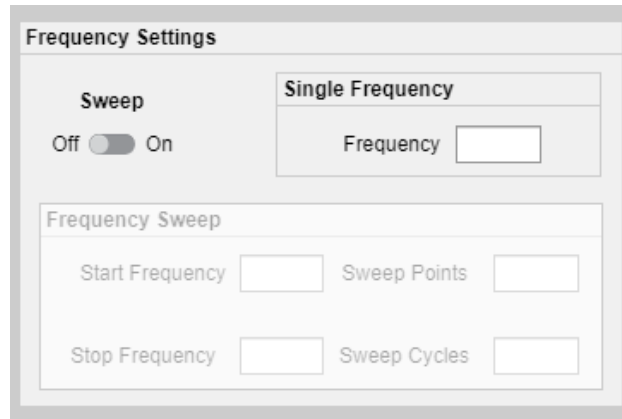


Figura 2.3: Bluetooth connection panel

Una volta avviata la comunicazione è possibile selezionare, tramite uno switch, il tipo di misura da effettuare:

- Single Frequency: indicando la frequenza alla quale effettuare la misura;
- Frequency Sweep: indicando la frequenza di start, di stop, numero di punti per lo sweep ed il numero di cicli di misurazione da effettuare.



The image shows a 'Frequency Settings' dialog box. It has a 'Sweep' section with a toggle switch set to 'On'. To the right is a 'Single Frequency' section with a 'Frequency' input field. Below these is a 'Frequency Sweep' section containing four input fields: 'Start Frequency', 'Sweep Points', 'Stop Frequency', and 'Sweep Cycles'.

Figura 2.4: Measurement settings

I parametri prima di essere inviati al Dispositivo vengono analizzati per riconoscere eventuali incompatibilità.

In particolare si verifica che i valori delle frequenza siano comprese tra 100 Hz e 100000 Hz , che la start frequency sia minore della stop frequency, che il numero di punti della sweep sia compreso tra 1 e 100 e che il numero di cicli sia un intero positivo.

In caso essi non rispettino i requisiti, un messaggio di errore specifico compare nella *console log*.

Il comando di *start* invia, al Dispositivo, i parametri preceduti dalle parole chiavi *start* o *start2*.

Processing and data visualization module

È il modulo principale con il quale viene gestito il processing dei dati ricevuti. A seconda del tipo di comunicazione viene richiamata una funzione specifica che opera come interrupt handler. Una volta ricevuti i dati è richiamata la funzione che li processa.

Vengono plottati su grafici distinti il Modulo e la Fase, aggiornando in maniera automatica il range degli assi in base al valore che si sta plottando, in questo modo si mantiene il grafico sempre centrato. Meccanismi di riconoscimento dei picchi permettono di bloccare l'aggiornamento degli assi in modo da mantenere la visione del picco per tutto l'intervallo di rappresentazione, fissato agli ultimi 50 sample ricevuti.

Gli stessi valori vengono visualizzati, contestualmente, in una tabella.

Il Processing Module, oltre alla rappresentazione dei dati, fornisce ulteriori funzionalità:

- Status: visualizzazione dello stato del Sistema tramite *console log* (Connected, Disconnected, Start Sent, Stop Sent, On Measurement);
- Aggiunta di Marker: possibilità di inserire dei marker temporali durante l'esecuzione delle misura e di rinominarli assegnandogli delle lable;
- Full Data Plot: alla fine della misurazione è possibile plottare tutti i dati ricevuti; si hanno due comportamenti diversi a seconda della tipologia di misura:
 - Single Frequency: vengono evidenziate le fasce comprese tra i marker inseriti, esse rappresentano zone di interesse;
 - Frequency Sweep: viene calcolata e plottata la media e la deviazione standard delle misure ricevute nei vari cicli.
- Save Data: salva i dati ricevuti in file *txt* dando la possibilità di scegliere il nome e il path.

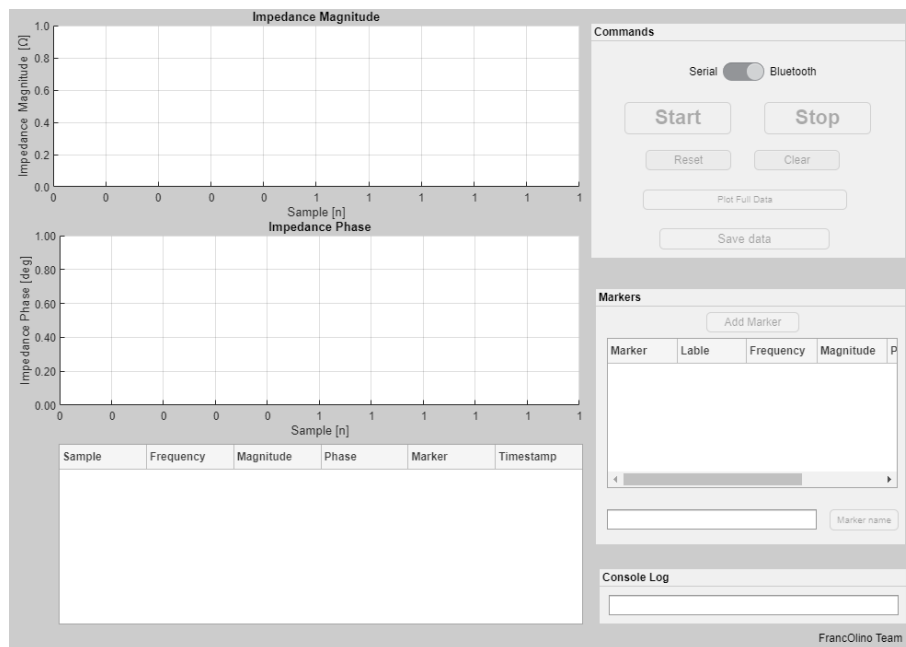


Figura 2.5: Processing and data Visualization module