



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Elettronica

TESI DI LAUREA

**Progettazione e realizzazione di un sensore indossabile per
l'acquisizione di segnali elettromiografici**

**Design and implementation of a wearable sensor for acquiring
electromyographic signals**

Candidato:
Jacopo Pagliuca

Relatore:
Prof. Giorgio Biagetti

Correlatore:
Prof. Paolo Crippa

Indice

1	Introduzione	2
2	Scelta componenti	2
2.1	BT840 e nRF52840	2
2.1.1	Regolatori	5
2.2	ADS1293	8
2.3	LTC4054	10
2.4	LDO TPS788	10
2.5	LSM6DSO	10
2.6	TC2050-IDC	11
3	Alimentazione e consumo corrente	11
3.1	LTC4054	12
3.2	nRF52840	13
3.3	ADS1293	15
3.4	LSM6DSO	16
3.5	Stima consumi	16
4	Schematico	16
4.1	BT840	17
4.2	ADS1293	18
4.3	LTC4054	19
4.4	LDO TPS788	19
4.5	LSM6DSO	20
4.6	TC2050-IDC	20
5	PCB Layout	21
5.1	Tecnologia e specifiche	22
6	Realizzazione	26
7	Codice	30
8	Misurazioni	34
9	Conclusioni	38

1 Introduzione

La presente tesi illustra i risultati e lo svolgimento del tirocinio svolto presso il dipartimento di ingegneria dell'informazione (DII), in collaborazione con il Prof. Giorgio Biagetti. Lo scopo del tirocinio è quello di progettare e realizzare un dispositivo indossabile per la ricezione di segnali elettromiografici. Il sistema sarà costituito da un singolo PCB (Printed Circuit Board) che dovrà essere di dimensioni ridotte per garantire il libero movimento, in quanto sarà utilizzato da pazienti in ambito ospedaliero. Sarà alimentato da una batteria ricaricabile a ioni di litio. I dati ottenuti dagli elettrodi saranno poi inoltrati ad un computer tramite protocollo Bluetooth.

La prima parte del tirocinio consiste nello studio dei componenti utilizzati e nella scelta delle migliori opzioni per soddisfare le specifiche. In seguito è stato progettato lo schematico e il layout del PCB vero e proprio. Infine il progetto viene inviato in azienda dove avviene la realizzazione della scheda. Una volta ricevuti i prototipi sono stati effettuati dei test tramite la scrittura di semplici programmi per verificare le caratteristiche elettriche.

2 Scelta componenti

2.1 BT840 e nRF52840

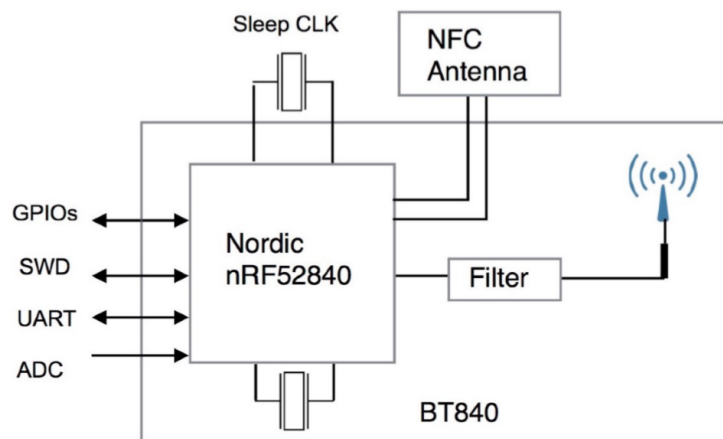


Figura 1: Diagramma a blocchi BT840F [2]

Riprendendo il lavoro precedentemente svolto dal dipartimento, si utilizza il modulo della "Fanstel" BT840 [2] che al suo interno implementa il microcontrollore nRF52840 [7] prodotto dalla Nordic Semiconductor.

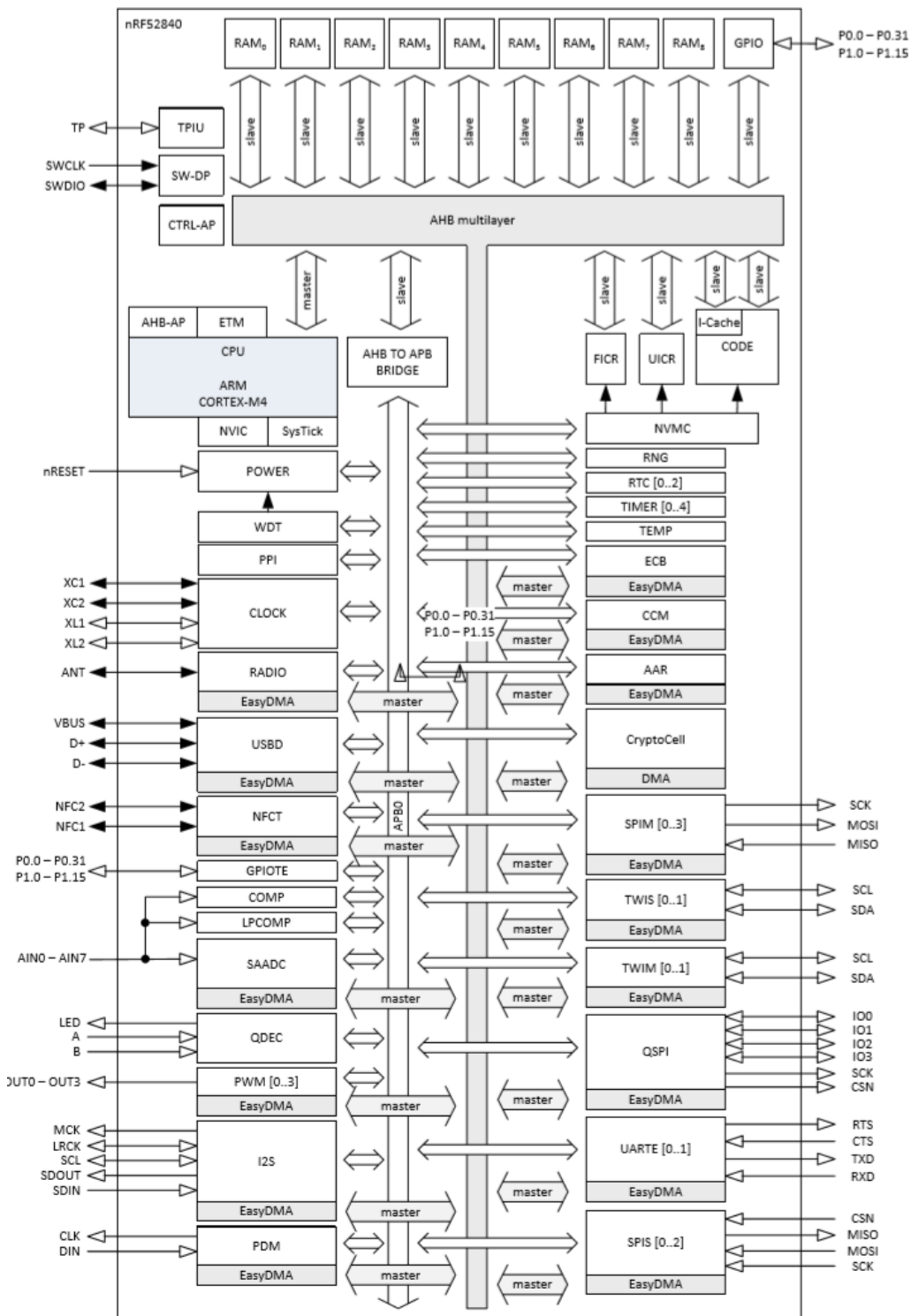


Figura 2: Diagramma a blocchi nRF52840 [7]

L'integrato in questione è costruito attorno ad un processore ARM Cortex M4 a 32bit con floating point unit alla frequenza di 64 MHz. Implementa una serie di istruzioni a 16 e 32 bit che consentono compattezza del codice e buona capacità di calcolo. Il modulo integra un'antenna con traccia PCB per comunicazioni Bluetooth, le quali sono supportate dal microcontrollore. Quest'ultimo possiede inoltre due stadi di regolatori di alimentazione, ognuno dei quali permette due configurazioni: LDO e DC/DC. Il primo stadio regola la tensione di alimentazione per la componente digitale mentre il secondo la abbassa ulteriormente fino a 1.3 V.

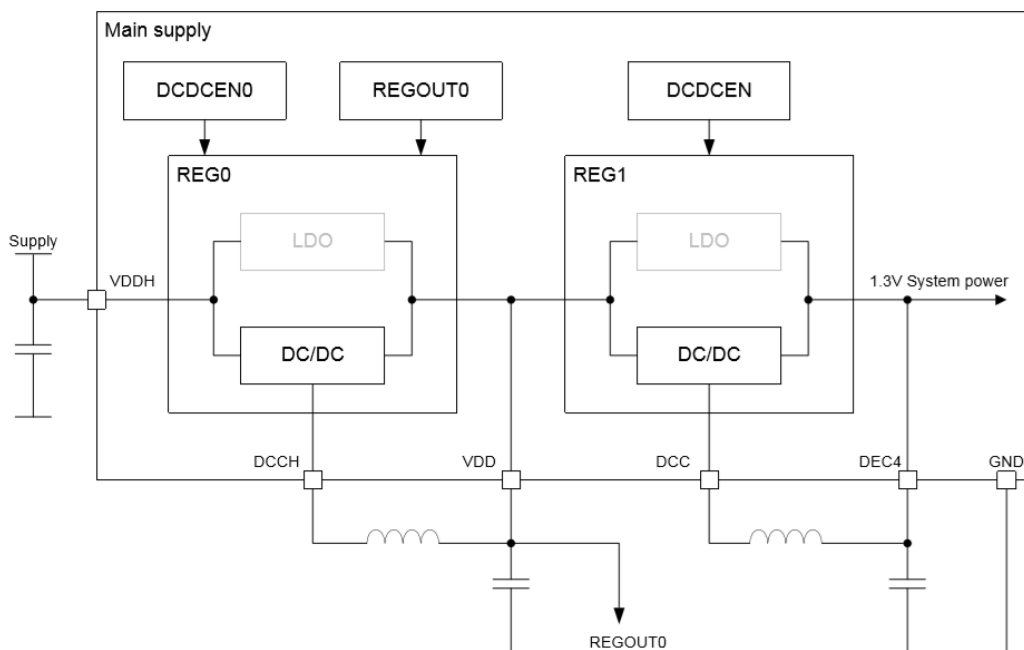


Figura 3: Stadi regolatori [7]

Il sistema di controllo del clock può generare i clock di sistema da una gamma di oscillatori ad alta frequenza interni o esterni e distribuirli ai moduli in base ai requisiti individuali di un modulo. La distribuzione del clock è automatizzata e raggruppata in modo indipendente da un modulo per limitare il consumo di corrente nei rami inutilizzati. Di seguito sono elencate le fonti principali di CLOCK:

- Oscillatore su chip a 64 MHz
- Oscillatore a cristallo a 64 MHz, con cristallo esterno da 32 MHz
- Oscillatore RC da 32,768 kHz +/- 500 ppm

- Oscillatore a cristallo da 32,768 kHz, con cristallo esterno da 32,768 kHz
- Oscillatore da 32,768 kHz sintetizzato dall'oscillatore a 64 MHz

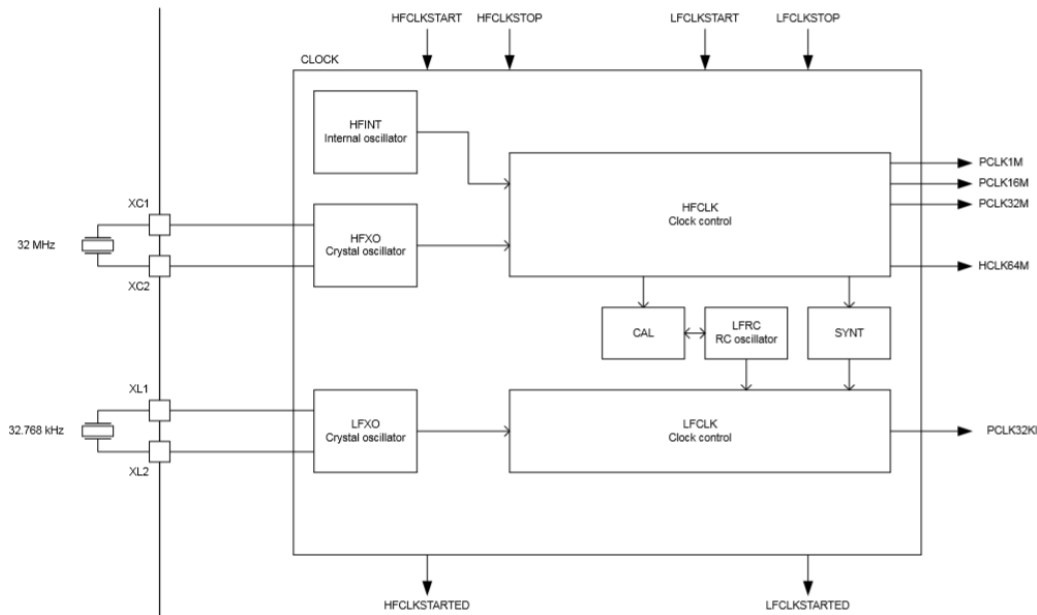


Figura 4: Clock control [7]

Nel nostro caso viene utilizzato il clock esterno da 32.768 kHz (LFXO), realizzato con due condensatori da 12 pF e un cristallo di quarzo.

2.1.1 Regolatori

I circuiti regolatori di tensione sono utilizzati in quasi tutte le applicazioni elettroniche. Il loro scopo è quello di fornire una tensione in uscita costante e stabile, indipendente dalla corrente assorbita dal carico, dalla tensione di ingresso, dalle condizioni ambientali e dall'invecchiamento. Le principali categorie di regolatori sono quelli lineari e quelli a switching. I regolatori low-dropout (LDO) sono regolatori a tensione costante basati su un MOSFET e un amplificatore differenziale che sfrutta la saturazione del transistor per mantenere la differenza di tensione tra ingresso e uscita. Il suo pregio principale è la capacità di regolare la tensione di uscita anche quando è molto simile a quella d'ingresso.

Inoltre, utilizzando un regolatore LDO, si evitano i disturbi caratteristici del regolatore DC/DC che applica una tensione continua su di un induttore

con un duty-cycle determinato per garantire la tensione di uscita costante. Quest'ultimo metodo è però molto più efficiente per quanto riguarda la dissipazione di potenza.

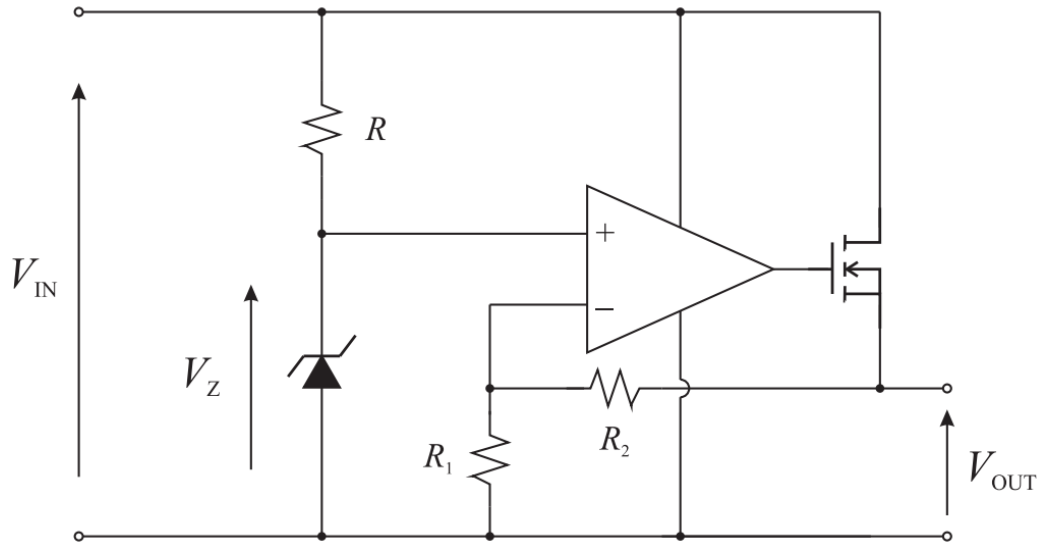


Figura 5: Regolatore lineare di tensione con stadio di uscita a drain comune

La tensione di uscita del regolatore lineare può essere espressa come:

$$V_{OUT} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_Z$$

dove V_Z rappresenta la tensione del diodo Zener, il quale, lavorando in regione di breakdown, fornisce una tensione di riferimento in ingresso all'amplificatore. Il circuito è quindi indipendente dalla tensione di ingresso, fatta eccezione per la leggera dipendenza della tensione V_Z dalla tensione di ingresso e dal coefficiente di reiezione delle variazioni della tensione di alimentazione, dato che esso è alimentato da V_{IN} . Lo stadio di uscita costituito da un MOSFET in configurazione di drain comune garantisce una elevata capacità di pilotaggio in corrente e massima corrente erogabile, dissipando potenza e convertendola in calore.

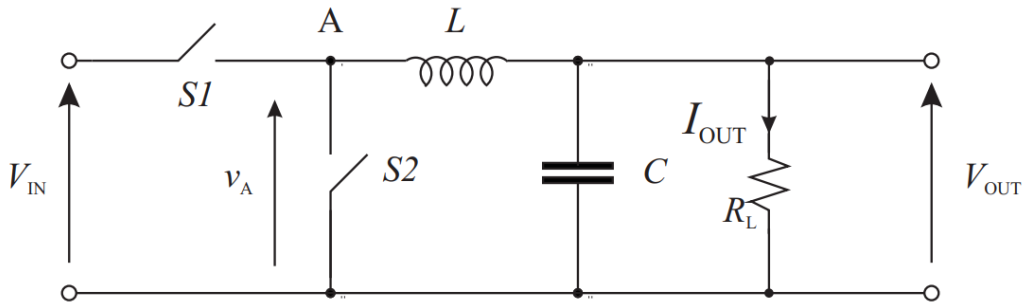


Figura 6: Convertitore DC-DC a commutazione

L'idea dei regolatori a switching è quella di convertire una tensione di ingresso V_{IN} in una tensione di uscita V_{OUT} applicata ad un carico, con la minima dissipazione di potenza.

Gli interruttori S_1 ed S_2 in figura sono abilitati in controfase con periodo T , ovvero quando uno dei due è chiuso l'altro è aperto, e viceversa. La forma d'onda risultante della tensione v_A è un treno di impulsi di ampiezza V_{IN} il cui duty-cycle all'interno del periodo T dipende dai tempi di chiusura dei due interruttori: $T = T_1 + T_2$.

La funzione di trasferimento del circuito LC in figura è:

$$H(\omega) = \frac{1}{1 - \omega^2 LC}$$

Scegliendo $\frac{1}{\sqrt{LC}} \ll \frac{2\pi}{T}$ le frequenze più alte della forma d'onda di v_A sono abbattute, lasciando passare solo la componente continua.

L'ampiezza di quest'ultima rappresenta il valore medio della forma d'onda:

$$V_{OUT} = \frac{1}{T} \int_0^T v_A(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{T_1} V_{IN} dt + \frac{1}{T} \int_{T_1}^{T_2} 0 dt = DV_{IN}$$

dove $D = \frac{T_1}{T}$ è il duty-cycle, cioè la porzione di periodo totale in cui il primo interruttore è acceso (di conseguenza il secondo è acceso per il restante periodo). Regolando questa frazione è possibile programmare la tensione di uscita del regolatore in funzione della tensione di ingresso.

Il rendimento di questo regolatore è molto alto poichè idealmente non c'è dissipazione di potenza negli interruttori. Le imperfezioni sono dovute principalmente alle perdite di conduzione e alle perdite di commutazione, dovute al fatto che i fronti della forma d'onda che pilota gli interruttori non sono istantanei. Inoltre la capacità e l'induttore possiedono elementi parassiti che dissipano una piccola quantità di potenza.

2.2 ADS1293

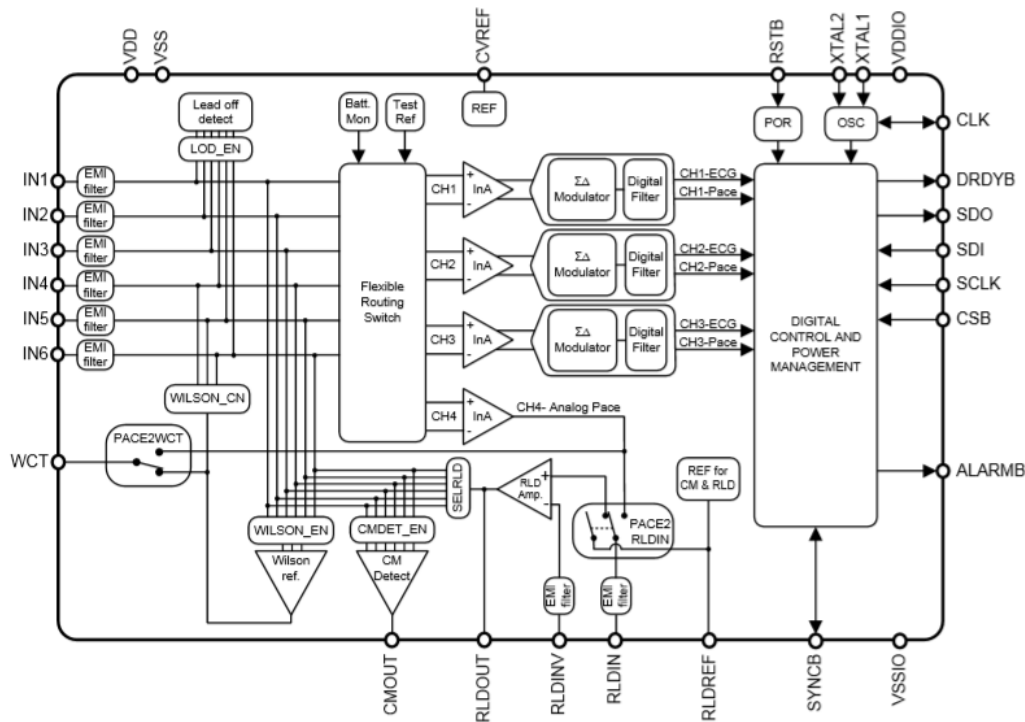


Figura 7: Diagramma a blocchi ADS1293 [3]

Per l'acquisizione del segnale elettromiografico si utilizza l'ADS1293 [3] della "Texas Instruments" capace di ottenere il segnale dagli elettrodi, filtrarlo, campionarlo e inviare il segnale digitale tramite protocollo seriale.

Il chip in questione riceve 6 input analogici. Il flexible routing switch in ingresso permette di configurare i collegamenti senza modificare l'hardware. Si possono effettuare misure alle tensioni di riferimento positive e negative generate internamente all'integrato o verificare lo stato della batteria, fattore di grande importanza per applicazioni portatili. I segnali attraversano poi amplificatori operazionali da strumentazione, modulatori di tipo sigma-delta e filtri digitali per poi arrivare all'unità logica che gestisce il protocollo di comunicazione e l'alimentazione oltre alla componente digitale.

Gli amplificatori da strumentazione forniscono una alta impedenza d'ingresso e amplificano il segnale di ingresso di un fattore 3.5. La massima tensione differenziale di ingresso è di 400 mV.

I modulatori sigma-delta quantizzano il segnale in uscita dagli amplificatori operazionali per portarlo poi ai filtri digitali. Essi operano a frequenze di 102.4 kHz o 204.8 kHz, prodotte internamente. Usando la frequenza più

alta si ottiene un rapporto di sovracampionamento migliore al costo di un maggior consumo di potenza.

Infine il filtro digitale è costituito da tre filtri SINC di quinto ordine programmabili. Ogni stadio filtra e decima lo stream di bit in modo da diminuire il data-rate in uscita e la banda del segnale, migliorando la risoluzione. All'uscita del secondo stadio è disponibile un segnale a 16 bit con mediocre risoluzione che può essere utilizzato per la misura del battito cardiaco. Questo segnale attraversa poi un terzo stadio che aumenta la risoluzione a 24 bit. A questo punto esso rappresenta una rappresentazione accurata del segnale ECG dal quale si può anche ricavare il segnale EMG richiesto.

Il Common-Mode (CM) Detector media i segnali di ingresso. Il risultato dell'operazione è utilizzata sia per il circuito del Right-Leg Drive (RLD) spiegato in seguito che per la schermatura dei cavi, riducendo la corrente di modo comune.

Il Right-Leg Drive è un amplificatore operazionale con lo scopo di regolare il CMRR dei segnali ottenuti dagli elettrodi per eliminare interferenze, misurando la tensione di modo comune del paziente. Il corpo umano può infatti comportarsi come una antenna, introducendo interferenze elettromagnetiche dovute dalla rete elettrica a 50 Hz.

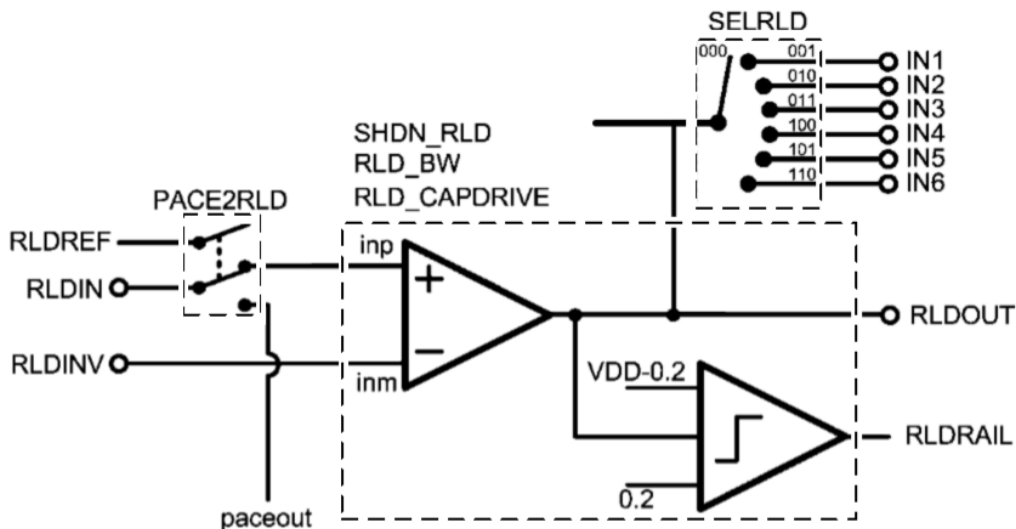


Figura 8: Circuito Right-Leg Drive [3]

Il blocco Lead-Off detect (LOD) consente di monitorare la corretta connessione degli elettrodi tramite iniezioni di correnti di test nei pin di input. Misurando la tensione che ne consegue è possibile stabilire la connessione degli elettrodi e la relativa impedenza. Se un cavo non stabilisce un contatto

adeguato, l'impedenza dell'elettrodo sarà alta e, di conseguenza, la tensione in risposta a una piccola corrente di prova sarà relativamente grande, mentre la tensione per un cavo ben collegato sarà piccola.

L'ADS1293 è progettato per lavorare con un clock a 409.6 kHz. Questo può essere generato tramite un oscillatore a cristallo interno o, come nel nostro caso, può sfruttare un clock esterno che sarà portato al pin *CLK* dal microcontrollore.

Inoltre, l'ADS1293 incorpora un sistema di allarmi di autodiagnostica per rilevare quando il sistema è fuori dalla gamma delle condizioni operative. Tali eventi vengono segnalati con flag di errore. Lo stato generale dei flag di errore è disponibile come segnale su un pin *ALARM* dedicato.

2.3 LTC4054

L'LTC4054 della "Linear Technology" [9] è un caricatore a corrente costante e tensione costante per la batteria a litio, ideale per applicazioni portatili e progettato per lavorare con alimentazione USB.

La resistenza R_{PROG} consente di programmare la corrente di carica come mostrato in seguito. È inoltre possibile misurare la corrente stessa tramite la tensione sul pin *PROG*, usando la formula:

$$I_{BAT} = \left(\frac{V_{PROG}}{R_{PROG}} \right) * 1000$$

2.4 LDO TPS788

Viene utilizzato per regolare la tensione di alimentazione del convertitore analogico digitale.

È possibile abilitarlo tramite il pin *ENABLE* che funge anche da alimentazione per la componente digitale.

Il regolatore TPS788 [5] è stato scelto per le ridotte dimensioni e la capacità di regolare la tensione di uscita a 3.3 V con una corrente di uscita di 150 mA, che può arrivare al massimo a 350 mA. Utilizza un transistor PMOS che consente una caduta di tensione tipica di 150 mV. Tramite il pin *SR* è possibile regolare lo slew-rate.

2.5 LSM6DSO

L'LSM6DSO [8] della "STMicroelectronics" è un sistema integrato che include un accelerometro digitale 3D e un giroscopio digitale 3D.

Comunica con il processore tramite protocollo I²C prevedendo anche 2 pin di interrupt.

2.6 TC2050-IDC

Il cavo TC2050-IDC [6] di "Tag-Connect" è un cavo a 10 conduttori dotato di un connettore Tag con perno a molla che si collega comodamente alla PCB e termina con un connettore a nastro da 0,1 pollici.

Questo connettore rappresenta un comodo mezzo per scrivere il programma nel processore, occupando anche uno spazio ridotto grazie al footprint costituito da semplici fori.

Tramite esso è possibile eventualmente implementare il protocollo di comunicazione con la USB, in modo da poi programmare tramite essa.

3 Alimentazione e consumo corrente

L'alimentazione di tutto il sistema è effettuata tramite una batteria al litio da 250 mAh che garantisce un buon rapporto peso/potenza e una tensione non troppo variabile nel range di utilizzabilità. Inoltre essa garantisce una lenta perdita della carica mentre non è in uso.

Le varie periferiche della scheda sono alimentate da tre diverse tensioni:

- $V_{BAT}=4.2V$: tensione fornita dalla batteria, in ingresso ai regolatori presenti nel modulo BT840 e al regolatore LDO TPS788 specifico per l'ADS1293.
- $V_{OUT,LDO}=3.3V$: tensione di uscita del regolatore LDO TPS788, alimenta l'ADS1293.
- $V_{DD}=1.8V$: uscita del primo regolatore all'interno del microcontrollore utilizzata anche per alimentare il giroscopio.

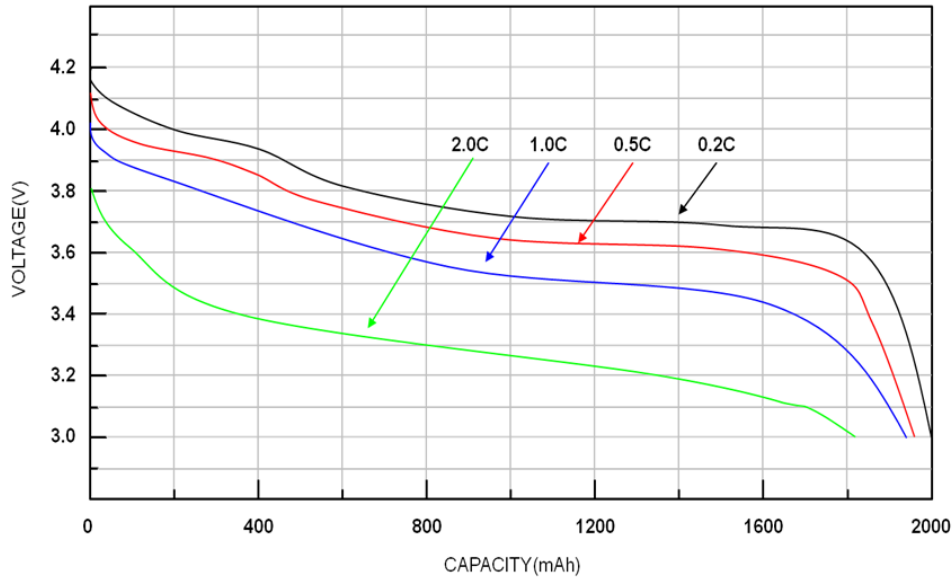


Figura 9: Funzione scarica di una batteria agli ioni di litio

3.1 LTC4054

Il caricabatteria è alimentato dalla linea V_{BUS} tramite un condensatore di bypass. Quando la tensione su questo pin differisce da quella della batteria di 30 mV il dispositivo entra in shutdown mode abbassando la corrente verso la batteria a 2 μ A.

Il pin *PROG* è utilizzato per programmare la corrente di carica utilizzando la seguente formula:

$$I_{CHG} = \frac{1000V}{R_{PROG}}$$

La resistenza R_{PROG} scelta è da 10 k Ω perciò la corrente programmata è di 100 mA. La corrente in uscita dal pin *BAT* può essere monitorata in ogni momento misurando la tensione sul pin *PROG*:

$$I_{BAT} = \frac{V_{PROG}}{R_{PROG}} * 1000$$

Il pin \overline{CHRG} invece, fornisce indicazione sul sufficiente voltaggio dell'alimentazione. Quando V_{DD} è sopra la soglia minima il pin attiva internamente un debole pull-down di circa 20 μ A. Nel momento in cui viene connessa una batteria scarica il pin viene portato a massa.

Quando la batteria è quasi carica, la corrente verso essa inizia a diminuire. Quando la corrente va sotto la soglia di 1/10 della corrente programmata, la

massa viene sostituita di nuovo dal debole pull-down, indicando la fine del ciclo di carica. Nel caso in cui la tensione di alimentazione venisse rimossa, il pin \overline{CHRG} diventa una alta impedenza.

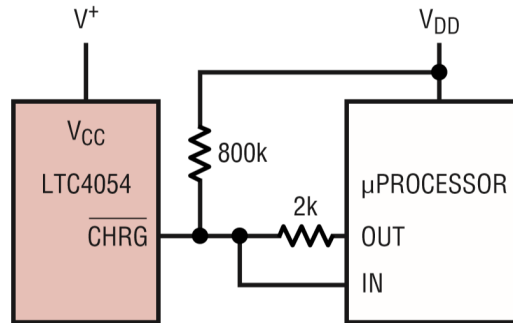


Figura 10: [9]

Connettendo il pin al microcontrollore come mostrato in figura è possibile determinare lo stato della carica.

Per rilevare quando l'LTC4054 è in modalità di carica, forzare il pin dell'uscita digitale (OUT) alto e misurare la tensione sul pin \overline{CHRG} . Il MOSFET a canale N ridurrà la tensione del pin a massa anche con la resistenza di pull-up da 2k Ω . Una volta terminato il ciclo di carica, il MOSFET a canale N viene spento e una sorgente di corrente da 20 μA è collegata al pin \overline{CHRG} . Il pin IN verrà quindi portato alto dal resistore pull-up 2k Ω . Per determinare se c'è una corrente di pull-down debole, il pin OUT deve essere forzato a uno stato di alta impedenza. La sorgente di corrente debole abbasserà il pin IN attraverso la resistenza da 800k Ω . Infine, se \overline{CHRG} è ad alta impedenza, il pin IN verrà portato alto, indicando che l'alimentazione è stata rimossa.

3.2 nRF52840

Il processore contenuto nel modulo BT840 è collegato alla batteria e, tramite i due stadi di regolatori, fornisce le tensioni adeguate per la componente analogica e digitale.

Symbol	Parameter	Min.	Nom.	Max.	Units
VDD	VDD supply voltage, independent of DCDC enable	1.7	3.0	3.6	V
VDD _{POR}	VDD supply voltage needed during power-on reset	1.75			V
VDDH	VDDH supply voltage, independent of DCDC enable	2.5	3.7	5.5	V
VBUS	VBUS USB supply voltage	4.35	5	5.5	V
t _{R,VDD}	Supply rise time (0 V to 1.7 V)			60	ms
t _{R,VDDH}	Supply rise time (0 V to 3.7 V)			100	ms
TA	Operating temperature	-40	25	85	°C

La corrente consumata dal dispositivo dipende dai componenti utilizzati, dalle attività eseguite e dalla temperatura.

Il primo regolatore richiede dall'alimentazione della batteria fino a 25 mA in "High voltage mode" durante la trasmissione radio.

Di seguito saranno elencati consumi massimi tipici dall'alimentazione V_{DD} in diverse configurazioni considerando:

- $V_{DD}/V_{DDH} = 3$ V
- Temperatura: 25 °C
- CPU in attesa di interrupt o eventi
- Periferiche non utilizzate
- Clock spento
- Regolatori: LDO
- RAM: Full 256 kB retention
- Compilatore: GCC v4.9.3 20150529
- Cache abilitata
- 32 MHz crystal: SMD 2520, 32 MHz, 10 pF +/- 10 ppm

Description	Max.	Units
Sleep	17.37	μ A
COMP active	35.1	μ A
CPU running	6.3	mA
NFCT active	400	μ A
Radio transmitting/receiving	16.4	mA
RNG active	635	μ A
SAADC active	1.24	mA
TEMP active	1.05	mA
TIMER running	823	μ A
WDT active	3.1	μ A
Compounded	16.2	mA

Il maggior consumo di corrente si ha durante la trasmissione radio, arrivando a 16.4 mA nel caso di:

- potenza di output di 8 dBm
- 1 Mbps
- modalità Bluetooth low energy (BLE)
- Clock: HFXO
- Regolatore: DC/DC

3.3 ADS1293

L'ADS1293 viene alimentato dall'uscita dell'apposito LDO che abbassa la tensione della batteria fino ai 3.3 V necessari. Per l'alimentazione digitale viene sfruttato lo stesso pin GPIO che abilita il regolatore tramite il processore, portando 1.8 V. In questo modo è possibile risparmiare sul consumo di corrente quando il dispositivo è in standby, abilitandolo solo quando necessario.

Parameter		Min.	Max.	Units
Analog Supply Voltage, VDD		2.7	5.5	V
Digital I/O Supply Voltage	VDD > 3.6 V	1.65	3.6	V
	VDD \leq 3.6 V	1.65	VDD	V
Full Scale Differential Input Voltage Range, DIVR			\pm 400	mV
Temperature Range		-20	85	$^{\circ}$ C

Il valore di corrente consumata dalla componente analogica assume valori tipici compresi tra 80 e 960 μA .

La corrente di quiescenza per I/O è di 0.6 μA .

3.4 LSM6DSO

Il giroscopio può essere alimentato da 1.71 V a 3.6 V. Esso sarà collegato a V_{DD} che fornisce 1.8 V. Il consumo massimo di corrente è di 0.55 mA in "high-performance mode". Al contrario dell'ADS1293 esso deve restare acceso per poter comunicare con il processore e non può essere disabilitato.

3.5 Stima consumi

Il primo regolatore fornisce per le periferiche esterne al massimo 25 mA quando la potenza della trasmissione radio è inferiore a 4 dBm. La corrente erogabile diminuisce in base a quella necessaria internamente, principalmente per la radio.

Questa corrente, nel nostro caso, è utilizzata dal giroscopio che richiede al massimo 0.55 mA. Questo valore è ammissibile anche nel caso limite nel quale la corrente erogata è di 1 mA.

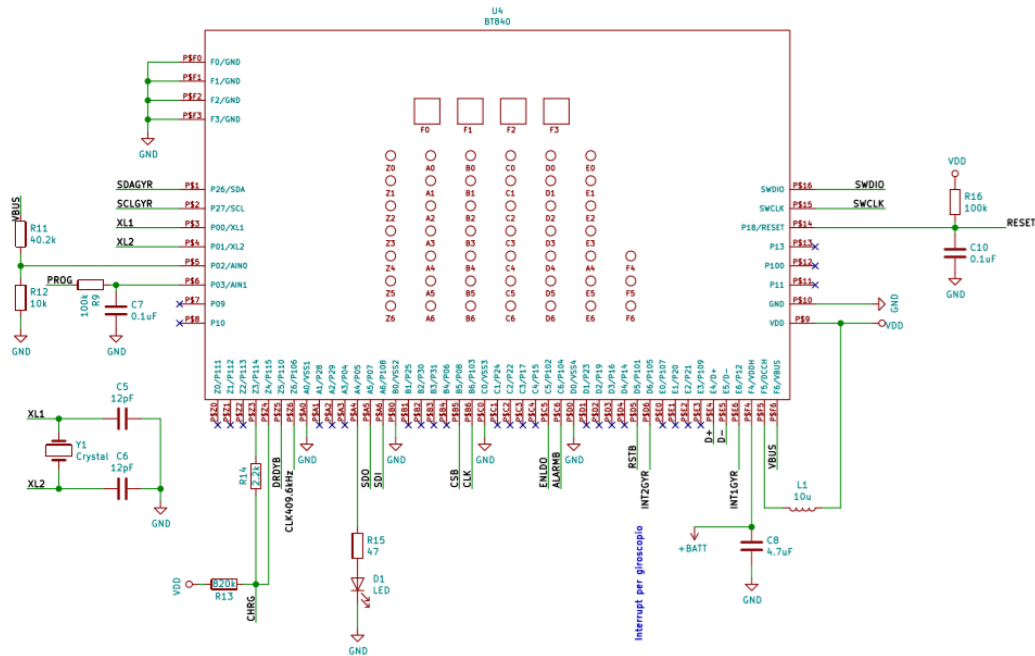
Il consumo dell'ADS1293 di 960 μA è ampiamente sopperito dal regolatore LDO che può erogare fino a 350 mA.

Per quanto riguarda la batteria, la corrente richiesta dall'ADS1293 e dal primo regolatore è largamente dipendente dalle configurazioni e dai moduli attivi. In seguito saranno effettuate delle misure dirette per stimare la durata media della batteria in base ai regolatori utilizzati.

4 Schematico

La progettazione dello schematico è stata fatta con il programma Kicad. Sono stati predisposti i collegamenti fra i vari componenti, necessari per la realizzazione delle piste vere e proprie. Piccoli condensatori in vicinanza ai pin dei componenti hanno lo scopo di evitare le interferenze dovute alla formazione di spire.

4.1 BT840



Per quanto riguarda il modulo della Fanstel sono stati disegnati i circuiti che permettono la comunicazione con le periferiche a lui associate.

Un partitore di tensione in un ingresso analogico ha lo scopo di misurare la V_{BUS} della USB. Le resistenze scelte sono da 40.2 k Ω e 10 k Ω per avere un rapporto di circa 5:1, in modo che dal pin *AIN0* sia possibile misurare la V_{BUS} moltiplicando il valore letto per 5.02.

Il clock esterno alla frequenza di 32.768 kHz è stato realizzato con due condensatori da 12 pF e un cristallo di quarzo.

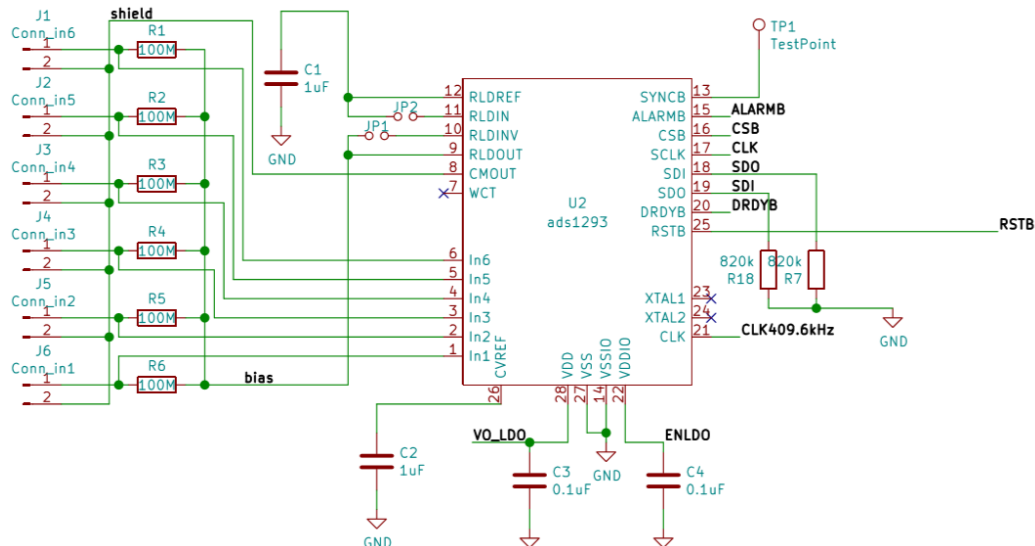
Un LED per eventuali test è connesso ad un pin "general purpose".

Il reset è previsto tramite un pull up e il pin *ID* della USB, in questo modo sarà sufficiente connettere un connettore USB type B per portare bassa la linea.

Per il regolatore DC/DC sono stati progettati condensatore e induttore opportuni, rispettivamente da 4.7 μ F e 10 μ H, con lo scopo di creare un filtro per ridurre il rumore causato dalla conversione a switching.

Infine altri pin hanno la funzione di comunicare con gli altri componenti nel PCB (convertitore analogico-digitale, giroscopio e connettore di programmazione).

4.2 ADS1293



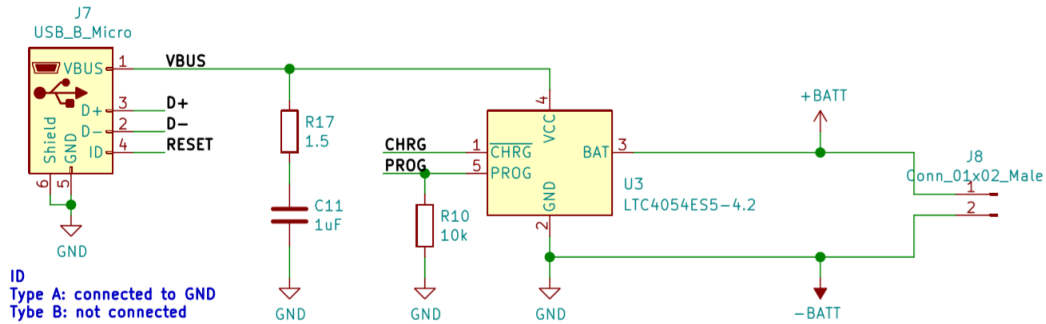
L'ADS1293 viene alimentato tramite l'uscita dell'LDO per quanto riguarda l'analogico e dal pin enable dello stesso per I/O.

Riceve il segnale analogico da sei elettrodi, ognuno dei quali ha un connettore costituito da un pin per il segnale e uno per lo shield con lo scopo di proteggere dai disturbi. Tramite apposite resistenze da $100\text{ M}\Omega$ il segnale dagli elettrodi viene polarizzato tramite il segnale di modo comune e quello del Right-Leg Drive.

L'integrato necessita inoltre di un clock da 409.6 kHz che verrà prodotto dal processore. I pin *ALARMB* (Alarm Bar), *DRDYB* (Data Ready Bar) e *RST* (Reset) sono anch'essi collegati al modulo insieme ai pin adibiti alla comunicazione SPI (*CSB*, *SDO*, *SDI*) che prevedono delle resistenze da $820\text{ k}\Omega$ in "pull-down" per le linee dati.

Nella posizione del jumper J1 sarà poi saldata una resistenza da 47Ω creando la retroazione dell'amplificatore del Right-Leg Drive.

4.3 LTC4054



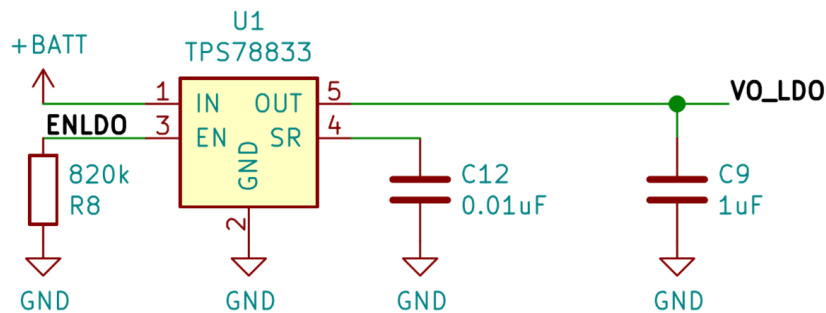
Il caricabatteria è alimentato dalla linea V_{BUS} tramite un condensatore di bypass.

La resistenza R_{PROG} è progettata per programmare la corrente di carica e il pin è utilizzato per monitorare la stessa.

Il pin $CHRG$ fornisce indicazione sul sufficiente voltaggio dell'alimentazione tramite apposite connessioni con in microcontrollore, come spiegato sopra.

La batteria al litio è poi connessa tra BAT e GND tramite un connettore verticale di tipo THT.

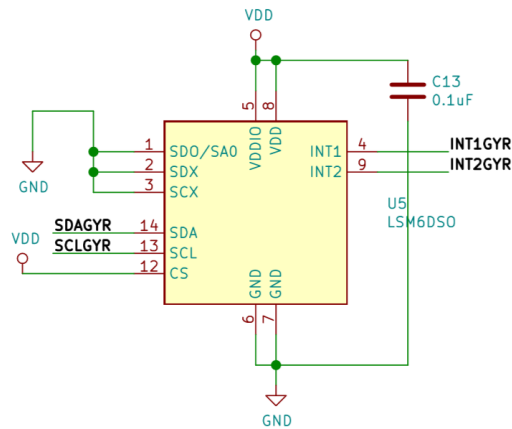
4.4 LDO TPS788



Il regolatore per l'ADS1293 riceve la tensione della batteria nel pin IN e fornisce la tensione abbassata a 3.3V dal pin OUT tramite un condensatore di bypass.

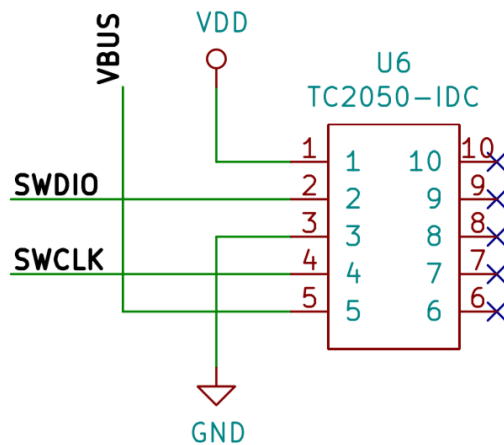
In seguito alla realizzazione si è riscontrato un errore: il pin EN è in realtà negato. Si è quindi tagliata la pista a lui associata ed è stata sostituita con un cavo saldato ad un pin libero del modulo della Fanstel.

4.5 LSM6DSO



La configurazione del giroscopio è costituita semplicemente dalle piste per il protocollo I²C e i due pin di interrupt.

4.6 TC2050-IDC



Il connettore di programmazione utilizza solo i pin di alimentazione (V_{DD} e V_{BUS}), massa e $SWDIO$ e $SWCLK$ per la comunicazione seriale con il processore.

5 PCB Layout

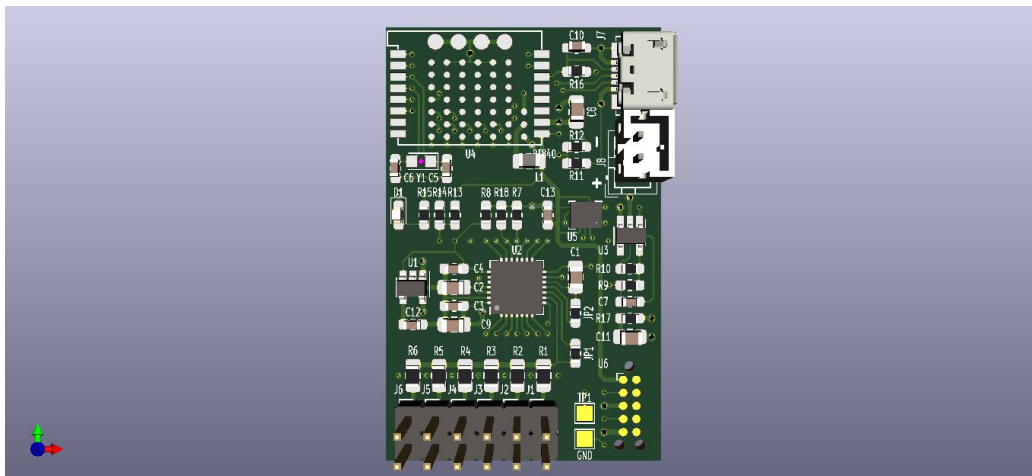


Figura 11: Visualizzazione 3D del PCB

La progettazione del layout del PCB consiste nel disegno della disposizione dei componenti e delle piste adibite al trasporto del segnale elettrico. Esse connettono i pin dei dispositivi in accordo con lo schematico, cercando di creare traiettorie più brevi possibili. La maggior parte di esse sfruttano dei fori chiamati "via" che attraversano, perforando la scheda, i quattro layer del PCB. Questi fori vengono placcati in rame e consentono nuovi percorsi per le piste, facendo da ponte fra i diversi strati ed evitando l'intersezione. Le dimensioni di piste e via sono in accordo alle specifiche di Eurocircuits, azienda presso la quale il progetto è stato poi realizzato.

Le dimensioni dei via rappresentano il foro già placcato, va quindi tenuto in considerazione lo spessore del rame e la distanza di isolante minima da tenere dalle piste per evitare cortocircuiti. Il diametro da utilizzare per la macchina perforatrice va quindi determinato in accordo con questa osservazione.

Il PCB prevede quattro layer: sul primo risiedono i componenti e dai loro pin partono delle piste che finiscono nei via, il secondo è il piano della massa, il terzo ed il quarto sono adibiti alle piste per i collegamenti.

Seguendo le raccomandazioni nel datasheet [2] l'antenna sporge dal PCB di 9.8 mm.

Particolare attenzione è stata riposta alla topologia delle piste che separa quanto più possibile quelle adibite al delicato segnale analogico e quelle a maggiore potenza che avrebbero potuto indurre disturbi.

Tutti i componenti sono in tecnologia SMD ad eccezione del connettore della batteria che necessita di maggiore stabilità e resistenza alla trazione.

La tecnologia a montaggio superficiale (SMD) prevede l'apposizione dei componenti senza predisporre dei fori. In questo caso è necessario prevedere durante la realizzazione lo spazio adibito al package. I componenti vengono posti sopra alla pasta saldante che verrà poi riscaldata per garantire l'adesione.

La tecnologia through-hole (THT) invece, consiste nella creazione di fori sulla superficie del PCB sui quali vengono inseriti i pin. I componenti THT sono più economici ma anche di dimensioni maggiori. Nel nostro caso la tecnologia THT viene utilizzata soltanto per il connettore della batteria.

5.1 Tecnologia e specifiche

Definizione Scheda

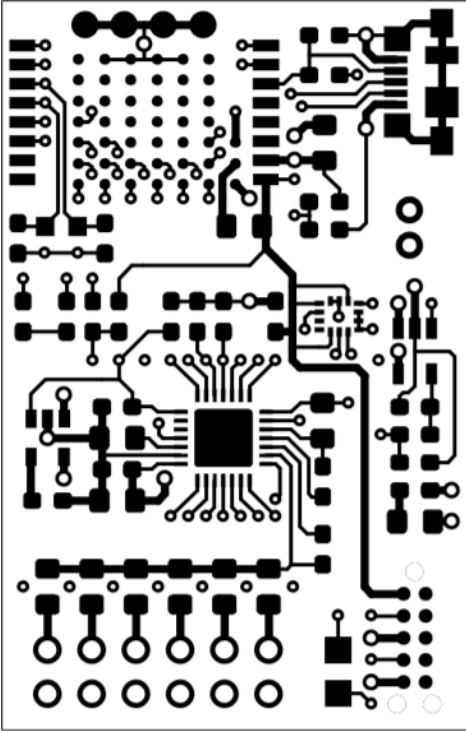
- Number of layers 4
- PCB width (X) 26.7 mm
- PCB height (Y) 42.0 mm
- Top soldermask Green
- Bottom soldermask Green
- Top legend White
- Bottom legend No
- Surface finish Che Ni/Au

Definizione pannello

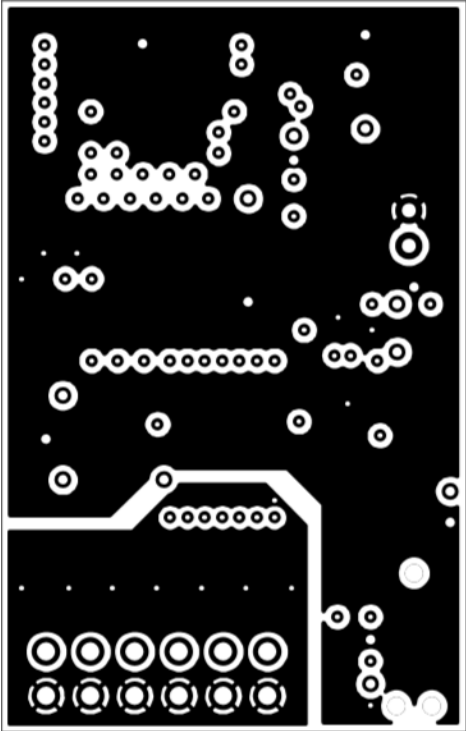
- Panel width 165.5 mm
- Panel height 66 mm
- PCBs per panel 5
- Panel border 10 mm
- PCB separation method Breakrouting
- PCB spacing 2 mm

Figura 12: I 4 layer del PCB

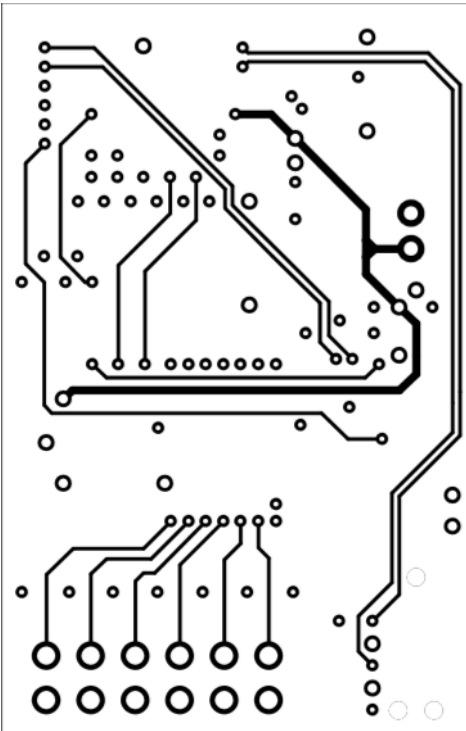
(a) *F.Cu*



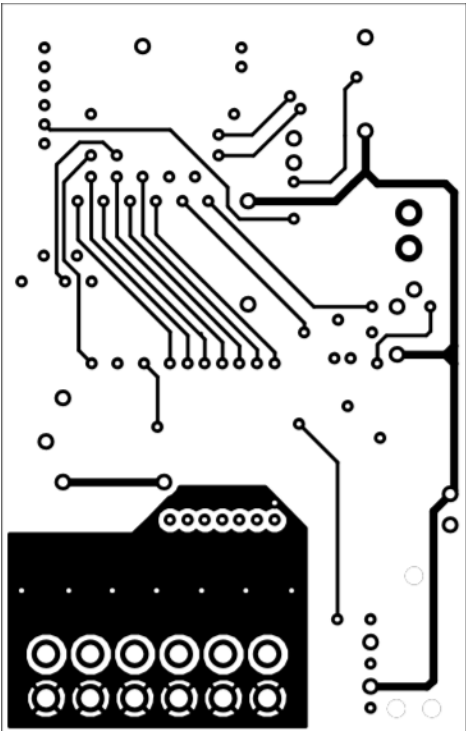
(b) *In1.Cu*



(c) *In2.Cu*



(d) *B.Cu*



- Panel without cross outs No
- Panel outline Routed

Tecnologia Scheda

- Pattern class 4
- Outer layer trackwidth (OL-TW) 0.200 mm
- Outer layer isolation distance (OL-TT-TP-PP) 0.200 mm
- Outer layer annular ring (OAR) 0.150 mm
- Inner layer trackwidth (IL-TW) 0.200 mm
- Inner layer isolation distance (IL-TT-TP-PP) 0.200 mm
- Inner layer annular ring (IAR) 0.150 mm

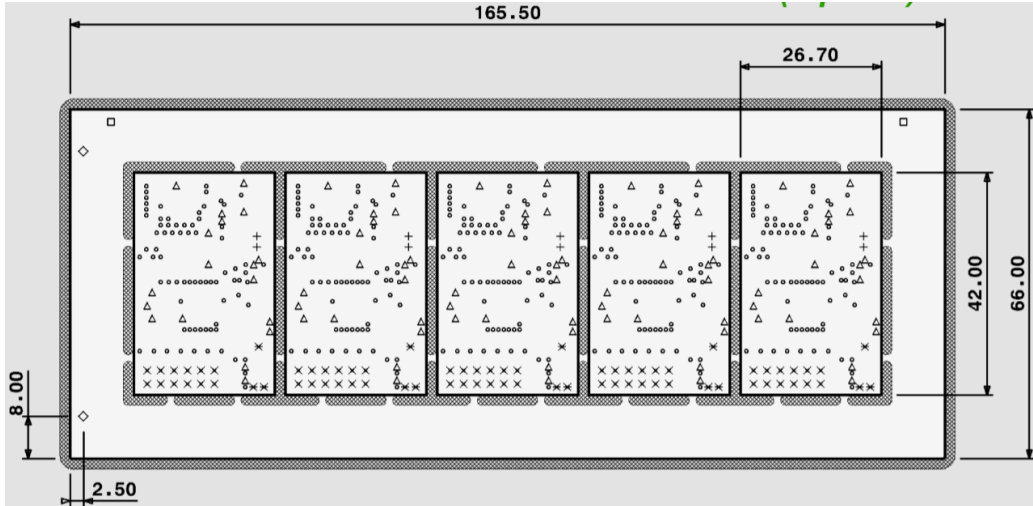
Definizione materiali

- Board thickness 1.55 mm
- Board buildup Standard buildup
- Base material FR4IMP
- Material Tg 145-150 °C
- Outer layer copper foil 18 μm (EndCu +/-35 μm)
- Inner layer copper foil 35 μm
- Extra PTH runs 0
- Extra press cycles 0
- Reversed buildup No
- Inner layer core thickness Standard

Figura 13: Dettagli componenti

Identified part	Description	Reference designators	Type	Components quantity
CGA4J3X7R1E105K125AB	1µF ±10% 25V Ceramic Capacitor X7R 0805 (2012 Metric) AEC-Q200	C1, C2, C9, C11	SMD	40
GRM1885C1H103JA01D	10000pF ±5% 50V Ceramic Capacitor COG, NPO 0603 (1608 Metric)	C12	SMD	10
GPC0603104	0603, Cap 100.0nF, 50V, 10.0%, X7R	C3, C4, C7, C10, C13	SMD	50
GCM1885C2A120FA16D	Multilayer Ceramic Capacitors MLCC - SMD/SMT 0603 12pF 100volts COG 1%	C5, C6	SMD	20
CGA4J1X7R1E475K125AC	4.7µF ±10% 25V Ceramic Capacitor X7R 0805 (2012 Metric),AEC-Q200	C8	SMD	10
SML-D12D8WT86C	LED, 0603, Orange, SMD, 20 mA, 2.2 V, 605 nm	D1	SMD	10
47346-0001	Connector, Micro USB Type B, Receptacle, Bottom Mount	J7	SMD	10
B2B-PH-K-S	Header, 2 Position, 2.0 mm Pitch, Disconnectable Crimp Style, Shrouded, Vertical, Through Hole	J8	TH	10
GPR060347R	0603, Res 47.0Ohm, 50V, 1.0%, 100mW	JP1, R15	SMD	20
MLZ1608N100LT000	Inductor, Decoupling 10uH 300mA 600 Mohm	L1	SMD	10
CRCW0805100MJPEAHR	100 MOhms ±5% 0.125W, 1/8W Chip Resistor 0805 (2012 Metric) Thick Film	R1, R2, R3, R4, R5, R6	SMD	60
GPR060310K	0603, Res 10.0kOhm, 50V, 1.0%, 100mW	R10, R12	SMD	20
CRCW060340K2FKEB	40.2 kOhms ±1% 0.1W, 1/10W Chip Resistor 0603 (1608 Metric) Automotive AEC-Q200 Thick Film	R11	SMD	10
GPR06032K2	0603, Res 2.2kOhm, 50V, 1.0%, 100mW	R14	SMD	10
GPR06031R5	0603, Res 1.5Ohm, 75V, 1.0%, 100mW	R17	SMD	10
CRCW0603820KJNEA	820 kOhms ±5% 0.1W, 1/10W Chip Resistor 0603 (1608 Metric) Automotive AEC-Q200 Thick Film	R7, R8, R13, R18	SMD	40
GPR0603100K	0603, Res 100.0kOhm, 50V, 1.0%, 100mW	R9, R16	SMD	20
TPS78833DBVR	Linear Voltage Regulator IC Positive Fixed 1 Output 150mA SOT-23-5	U1	SMD	10
ADS1293CISQ/NOPB	3 Channel AFE 24 Bit 28-WQFN (5x5)	U2	QFN FinePitch	10
LTC4054ES5-4.2#TRMPBF	Charger IC Lithium-Ion TSOT-23-5	U3	SMD	10
BT840F	Bluetooth Modules (802.15.1) Bluetooth Module	U4	SMD	10
LSM6DSOTR	Accelerometer, Gyroscope, 3 Axis Sensor I ² C, SPI Output	U5	QFN FinePitch	10
ECS-.327-9-12R-C-TR	32.768kHz ±10ppm Crystal 9pF 70 kOhms 2-SMD, No Lead	Y1	SMD	10

Figura 14: PCB Mechanical view (topview)



Symbol	Type	Kind	End dia [mm]	Tool dia [mm]	Count	±Tol
○	Via	Drill	0.25	0.35	380	0.10
△	Via	Drill	0.50	0.60	90	0.10
+	Plated	Drill	0.80	0.90	10	0.10
×	Plated	Drill	1.00	1.10	10	0.10
◇	Unplated	Drill	3.00	3.00	2	0.05
□	Unplated	Drill	3.00	3.00	2	0.05
×	Unplated	Drill	1.00	1.00	15	0.05

6 Realizzazione

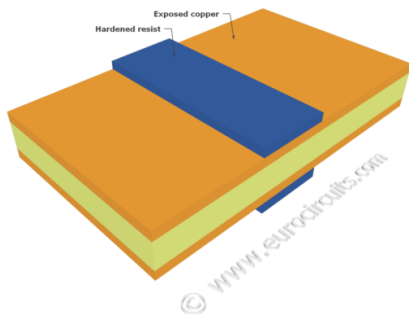
La realizzazione del circuito stampato [1] avviene in azienda conferendo la BOM (bill of materials) e il file gerber che contiene le informazioni sui vari strati di rame, maschere di saldatura e foratura, e pad dei componenti. I dati forniti dal cliente (gerber) vengono utilizzati per realizzare i dati di produzione per lo specifico PCB. Esso è composto da quattro strati principali:

- Substrato: lo scheletro del PCB realizzato in fibra di vetro per garantire stabilità e resistenza alla rottura.
- Copper Layer: a seconda del tipo di scheda, questo strato può essere un foglio di rame o un rivestimento di rame completo. Il suo ruolo è quello di trasportare i segnali elettrici.

- Solder Mask: strato di polimero con lo scopo di proteggere il rame ed evitare corto-circuiti dovuti all'interazione con l'ambiente esterno.
- Silkscreen: lo strato più esterno; si trova nel lato in cui ci sono i componenti e mostra numeri dei componenti, loghi, riferimenti e test point.

In seguito a vari controlli dei file di design, vengono stampati dei film trasparenti dove l'inchiostro nero rappresenta le tracce e quello trasparente le aree non conduttive (per gli strati esterni vale l'opposto). Ogni layer e corrispettiva solder mask ha il suo film. Una volta che essi sono stati stampati, vengono allineati e viene realizzato un foro chiamato "registration hole" utilizzato per allineare di nuovo i film nelle fasi successive.

Per primi vengono stampati gli strati intermedi: La prima fase della produzione vera e propria consiste nella stampa del progetto su una lastra di laminato rivestita da uno strato di rame. A questa lamina viene poi sovrapposto uno strato di materiale foto-sensibile chiamato fotoresist, costituito da sostanze chimiche che reagiscono all'esposizione a raggi ultravioletti, indurendosi.



Dopo che il fotoresist è stato allineato al laminato, viene irradiato da luce ultravioletta attraverso il film in modo che l'inchiostro nero non lasci indurire le aree in cui il rame va rimosso. La scheda viene poi lavata con una soluzione alcalina per rimuovere le rimanenze di fotoresist.

Per rimuovere il rame non coperto da fotoresist viene utilizzata una diversa soluzione chimica. Un terzo

solvente ha poi lo scopo di rimuovere il fotoresist lasciando soltanto la scheda con il rame necessario. Questo processo viene ripetuto per tutti i layer interni del PCB. Una volta ripulite le schede vengono allineate, perforate e sottoposte a dei controlli tramite ispezioni ottiche.

Gli strati esterni del multistrato sono costituiti da fogli di tessuto di vetro preimpregnati con resina epossidica non indurita (preimpregnato) e un sottile foglio di rame.

Un operatore posiziona un foglio di rame e due strati di preimpregnato ai quali sovrappone il nucleo costituito dagli strati interni. Infine lo strato superiore è di nuovo composto da due strati di preimpregnato e uno di rame.

A questo punto, tramite una pressa controllata da un computer, il multistrato viene compattato e gli strati si fondono grazie al calore.

Il PCB è ora pronto per la foratura. Una trivella a raggi-X crea dei precisi fori di riferimento per assicurarsi che la foratura sia precisa anche

negli strati intermedi. Il banco di perforazione viene preparato posizionando un materiale per evitare che il trapano strappi la lamina di rame al suo passaggio. Anche allo strato superiore di ingresso del trapano viene sovrapposto un foglio di alluminio.

La macchina per le perforazioni è computerizzata; conoscendo le coordinate del foro, la trivella riesce a compiere 150000 giri al minuto. L'elevata velocità di rotazione permette di avere fori puliti pronti per la placcatura in rame. Vengono eseguiti fori per i componenti e per i via che collegano le zone di rame dei diversi layer.

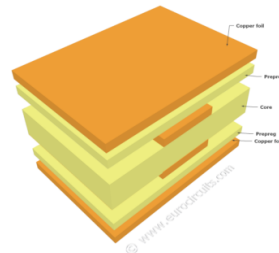
Il processo di placcatura consiste nel deposito chimico di un sottile strato di rame sulle pareti dei fori. Tramite una gru il PCB attraversa varie immersioni che consistono nel deposito di un micron di rame per la galvanizzazione seguita dall'apposizione di particelle di palladio per poi eseguire il placcaggio in rame vero e proprio, arrivando a 25 micron di spessore.

A questo punto i layer esterni del PCB devono ancora prendere la forma del progetto. In modo simile al procedimento eseguito per gli strati intermedi viene posizionato uno strato di fotoresist e il film trasparente. Questa volta però il film avrà l'inchiostro nero nelle aree in cui dovrà rimanere il rame a progetto ultimato, al contrario del processo precedente. In questo modo, in seguito all'esposizione ai raggi ultravioletti, rimarrà non coperto il rame delle piste, pronto per essere placcato (galvanostegia).

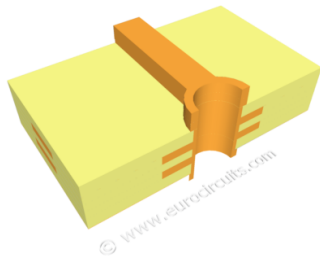
La scheda viene montata su delle barre di sostegno. I pannelli stessi e lo strato di carbonio depositato nei fori agiscono come catodi per la galvanizzazione che viene eseguita tramite diverse immersioni. Per assicurare una corretta conduzione lungo i fori la placcatura deve essere di almeno 25 microns; lo stesso vale per le superfici esterne (25-30 microns). La macchina garantisce che lo spessore sia omogeneo. Infine viene aggiunto un sottile strato di stagno utile per la fase successiva.

Il fotoresist viene dissolto e, grazie ad una soluzione alcalina, viene rimosso il rame non coperto dallo stagno. Per ultimo viene tolto lo stagno rivelando il disegno di progetto delle piste in rame.

La maggior parte delle schede possiede uno strato di maschera di saldatura per proteggere il rame e per evitare cortocircuiti durante l'assemblaggio



di componenti. La macchina per il rivestimento copre entrambi i lati con questa maschera, costituita da inchiostro epossidico. Lo strato assume poi la forma desiderata con il solito processo di irradiazione di raggi ultravioletti che induriscono l'inchiostro dove necessario. L'operatore controlla a questo punto se ci sono tracce di inchiostro non desiderate che comprometterebbero la saldatura.



Tramite una catena automatizzata viene depositato uno strato di nichel e uno strato di oro per proteggere ulteriormente il rame finché non avverrà la saldatura. Per i connettori sui bordi viene usata la placcatura in oro.

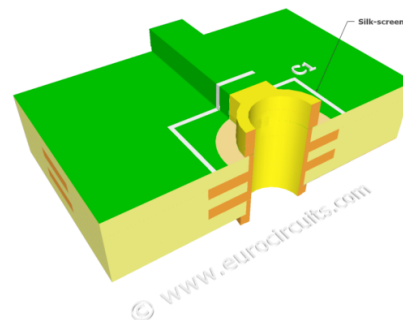
Il silk-screen serve ad indicare una legenda per le locazioni dei componenti.

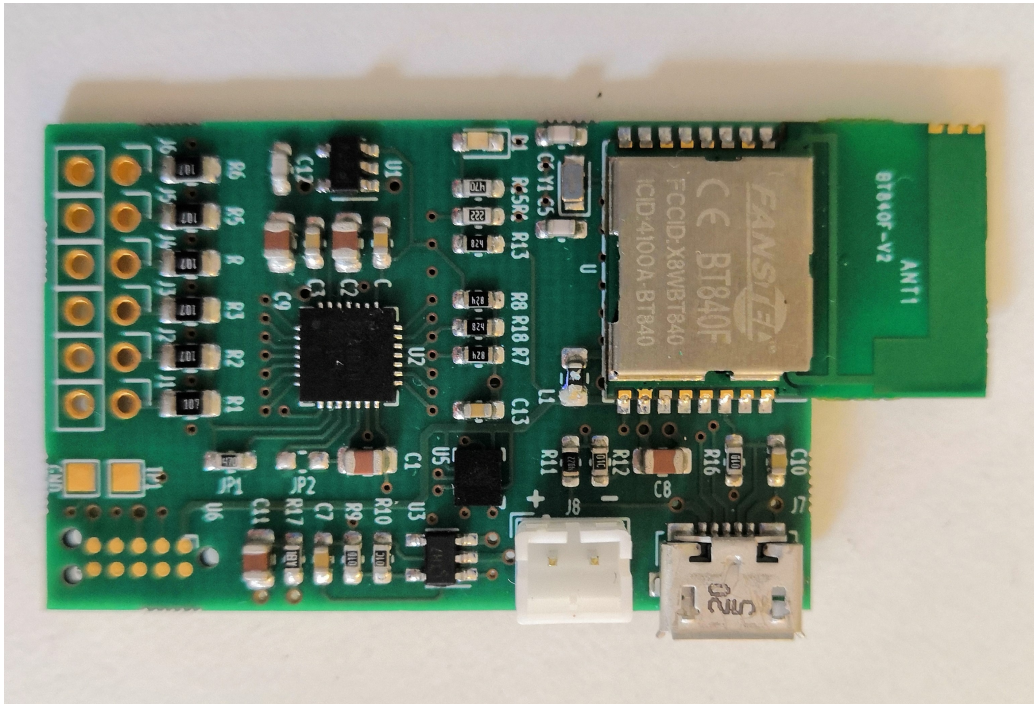
Oggi vengono usate delle stampanti a getto d'inchiostro mentre prima il processo era molto più lungo e comprendeva l'uso di serigrafie.

Al termine della produzione ogni maglia della scheda viene testata per verificare che non siano presenti corto-circuiti o circuiti aperti. Per fare ciò viene usato un "pettine" di 4000 sonde, capace di ricreare la topografia completa del circuito.

A questo punto ogni singolo PCB viene separato con una macchina per il taglio del pannello.

L'ultima fase consiste nell'ispezione tecnica per identificare eventuali difetti. Il prodotto viene poi sigillato a vuoto per evitare il contatto con sporcizia e umidità, imballato e spedito al cliente.





7 Codice

Per effettuare vari test sulla scheda è stata progettata una funzione in C. Tramite eventi gestiti dal Bluetooth si vuole far in modo che il microcontrollore disponga diverse configurazioni per l'alimentazione. In particolare verranno controllati i due stadi di regolatori per il nRF52840 e il regolatore LDO per l'ADS1293.

```
1 /*
2 * test_function.c
3 *
4 * Created on: 4 set 2019
5 * Author: Jacopo
6 */
7
8 #include <stdbool.h>
9 #include <stdint.h>
10 #include "boards.h"
11
12 void ramtoUicr (uint32_t volatile *regUicr, uint32_t regRam);
13 void setRegout0 (uint32_t value);
14
15 /*
16 * This function should be called by on_write on a new event.
```

```

17 * The input parameter is p_evt_write->data and it should checks
    also if (p_evt_write->len == 2)
18 */
19 void test (uint8_t ble_input)
20 {
21     switch (ble_input) {
22     case 0:
23         sd_power_dcdc_mode_set(NRF_POWER_DCDC_DISABLE); //NRF_POWER->
                DCDCEN = 0;
24         sd_power_dcdc0_mode_set(NRF_POWER_DCDC_ENABLE); //NRF_POWER->
                DCDCEN0 = 1;
25
26         // uint32_t sd_power_dcdc0_mode_set (uint8_t dcdc_mode)
27         // Enable or disable the DC/DC regulator for the regulator stage
                0 (REG0).
28         //     NRF_POWER_DCDC_DISABLE: The DCDC is disabled.
29         //     NRF_POWER_DCDC_ENABLE: The DCDC is enabled.
30         break;
31     case 1:
32         sd_power_dcdc_mode_set(NRF_POWER_DCDC_ENABLE);
33         sd_power_dcdc0_mode_set(NRF_POWER_DCDC_DISABLE);
34         break;
35     case 2:
36         sd_power_dcdc_mode_set(NRF_POWER_DCDC_ENABLE);
37         sd_power_dcdc0_mode_set(NRF_POWER_DCDC_ENABLE);
38         break;
39     case 3:
40         nrf_gpio_pin_write(EMGPOWER, 1);
41         break;
42     case 4:
43         nrf_gpio_pin_write(EMGPOWER, 0);
44         break;
45     case 5:
46         setRegout0(1);
47         break;
48     case 6:
49         setRegout0(2);
50         break;
51     case 7:
52         setRegout0(3);
53         break;
54     case 8:
55         setRegout0(4);
56         break;
57     case 9:
58         setRegout0(5);
59         break;
60     }
61 }

```



```

62
63 /*
64 * This function takes as parameter an int value to set the
        register REGOUT0 that determines
65 * the output voltage from of REG0 regulator stage.
66 * It copies the UICR whole register to the RAM, set REGOUT0,
        erase UICR and then it write all
67 * the UICR registers with the change applied.
68 *
69 */
70 void setRegout0(uint32_t value)
71 {
72     nrf_sdh_disable_request();
73     NRF_UICR_Type temp = *NRF_UICR;
74     temp.REGOUT0 = value; // set REGOUT0
75     NRF_NVMC->ERASEUICR; // erase UICR
76
77     // flush pipeline
78     __ISB();
79     __DSB();
80
81     ramtoUicr(&NRF_UICR->PSELRESET[0], temp.PSELRESET[0]);
82     ramtoUicr(&NRF_UICR->PSELRESET[1], temp.PSELRESET[1]);
83     ramtoUicr(&NRF_UICR->APPROTECT, temp.APPROTECT);
84     ramtoUicr(&NRF_UICR->NFCPINS, temp.NFCPINS);
85     ramtoUicr(&NRF_UICR->DEBUGCTRL, temp.DEBUGCTRL);
86     ramtoUicr(&NRF_UICR->REGOUT0, temp.REGOUT0);
87     NVIC_SystemReset();
88 }
89
90 /*
91 * This function allows to write from the RAM to the flash memory
92 * .
93 * It checks whether the value isn't 1, otherwise it does not
        rewrite the 1.
94 * The parameters are the single RAM input registers and the
        FLASH output registers.
95 */
96 void ramtoUicr(uint32_t volatile *regUicr, uint32_t regRam)
97 {
98     if (regRam != 0xFFFFFFFF) {
99         NRF_NVMC->CONFIG = NVMC_CONFIG_WEN_Wen << NVMC_CONFIG_WEN_Pos;
100         // write enable
101         while (NRF_NVMC->READY == NVMC_READY_READY_Busy) {
102         }
103         *regUicr = regRam;
104         while (NRF_NVMC->READY == NVMC_READY_READY_Busy) {
105         }
106     }

```

```

104 NRF_NVMC->CONFIG = NVMC_CONFIG_WEN_Ren << NVMC_CONFIG_WEN_Pos;
    // read enable
105 while (NRF_NVMC->READY == NVMC_READY_READY_Busy) {
106 }
107 }
108 }

```

Di default entrambi i regolatori DC-DC sono disabilitati. Per abilitarli è necessario settare ad 1 il bit 0 dei registri **DCDCEN** e **DCDCEN0** tramite le funzioni: `sd_power_dcdc_mode_set(NRF_POWER_DCDC_ENABLE)` e `sd_power_dcdc0_mode_set(NRF_POWER_DCDC_ENABLE)`.

Il registro **REGOUT0** invece, imposta il livello di tensione all'uscita del primo regolatore tramite i bit 0,1 e 2.

Tabella 1: **REGOUT0**

Value ID	Value	Description
1V8	0	1.8 V
2V1	1	2.1 V
2V4	2	2.4 V
2V7	3	2.7 V
3V0	4	3.0 V
3V3	5	3.3 V
DEFAULT	7	Default voltage: 1.8 V

Il registro **REGOUT0** si trova però nel banco UICR contenuto nella memoria flash, non è quindi facilmente modificabile. Per interagire con esso è necessario copiare l'intero stato del banco nella memoria RAM e modificare qui il contenuto del registro interessato. A questo punto è possibile eliminare il contenuto di UICR e riscrivere l'intero banco dopo aver liberato i buffer da eventuali dati temporanei.

Le operazioni tramite il controllore NVMC sono però limitate con il soft-device attivo, perciò è stato disabilitato fino al prossimo reset. Durante il processo di scrittura è necessario abilitare scrittura e lettura e attendere che il processore sia libero dalla comunicazione radio.

L'intera funzione sarà poi chiamata dalla funzione `on_write`, la quale gestisce gli eventi di scrittura, nel file "ble.cus.c" alla ricezione di un handle predisposto. Il valore ricevuto sarà il parametro della funzione `test` e tramite uno switch-case selezionerà la configurazione voluta.

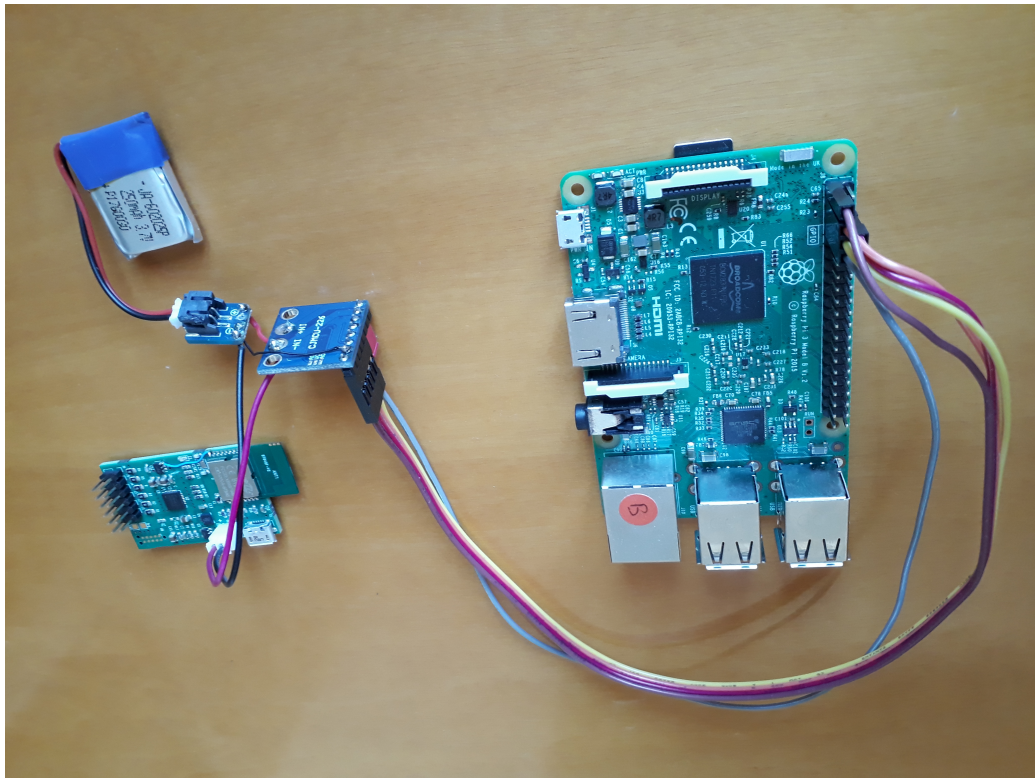
Segue una illustrazione della funzione `on_write` nel caso in cui venga ricevuto l'handle per il CCCD (Client Characteristic Configuration Descriptor).

```

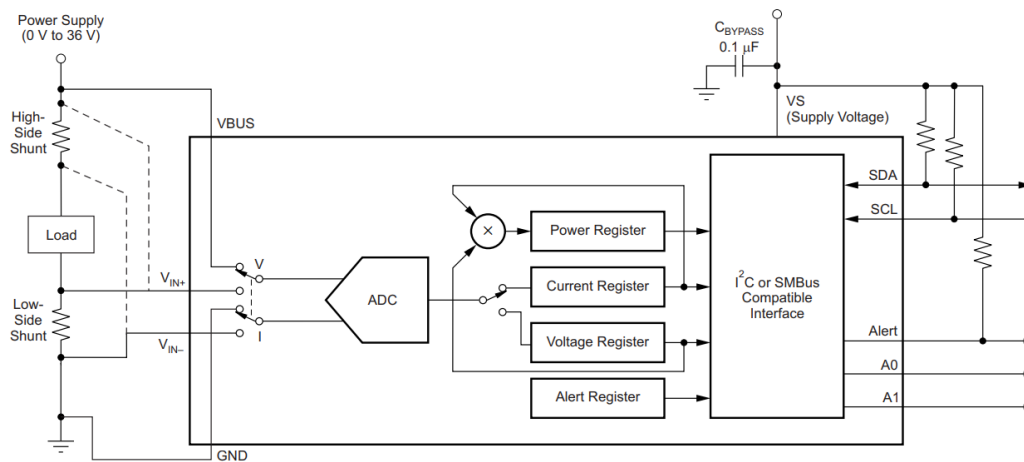
1 static void on_write(ble_cus_t * p_cus, ble_evt_t const *
    p_ble_evt)
2 {
3 ble_gatts_evt_write_t const * p_evt_write = &p_ble_evt->evt.
    gatts_evt.params.write;
4
5 if (p_evt_write->handle == p_cus->meas_handles.cccd_handle)
6 {
7 on_cccd_write(p_cus, p_evt_write);
8 }
9 }

```

8 Misurazioni

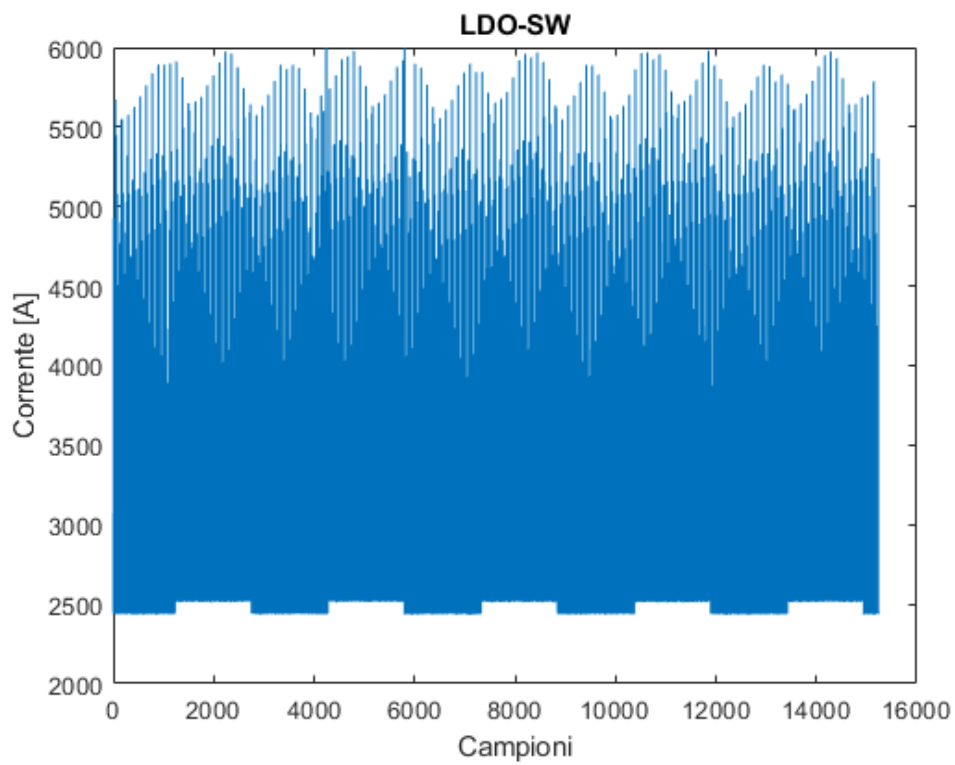
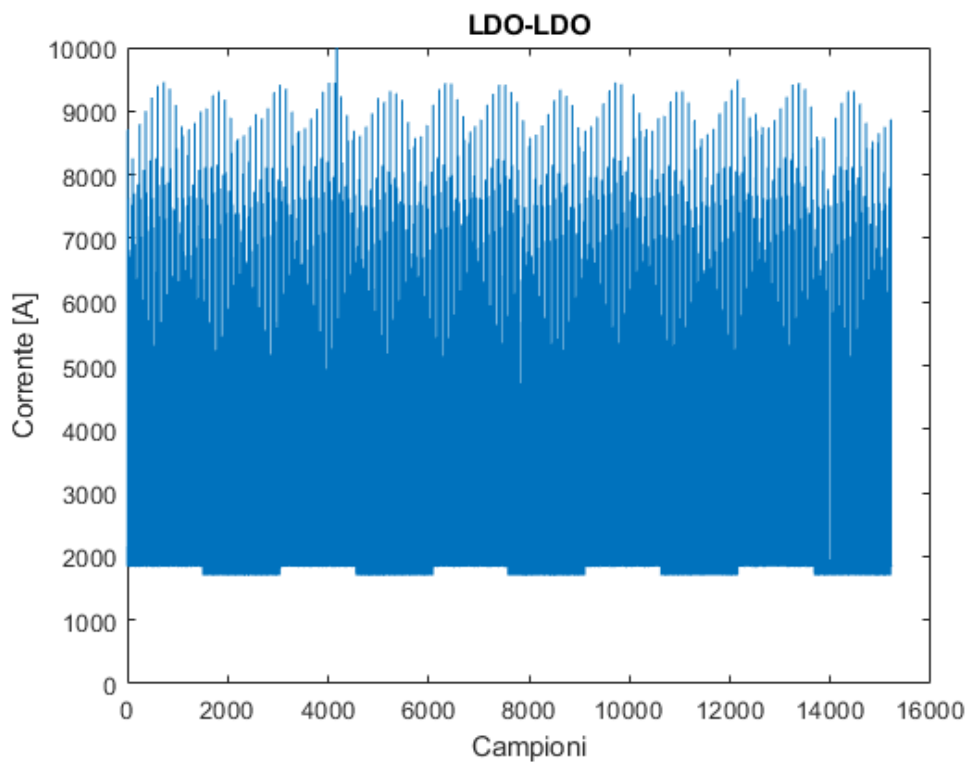


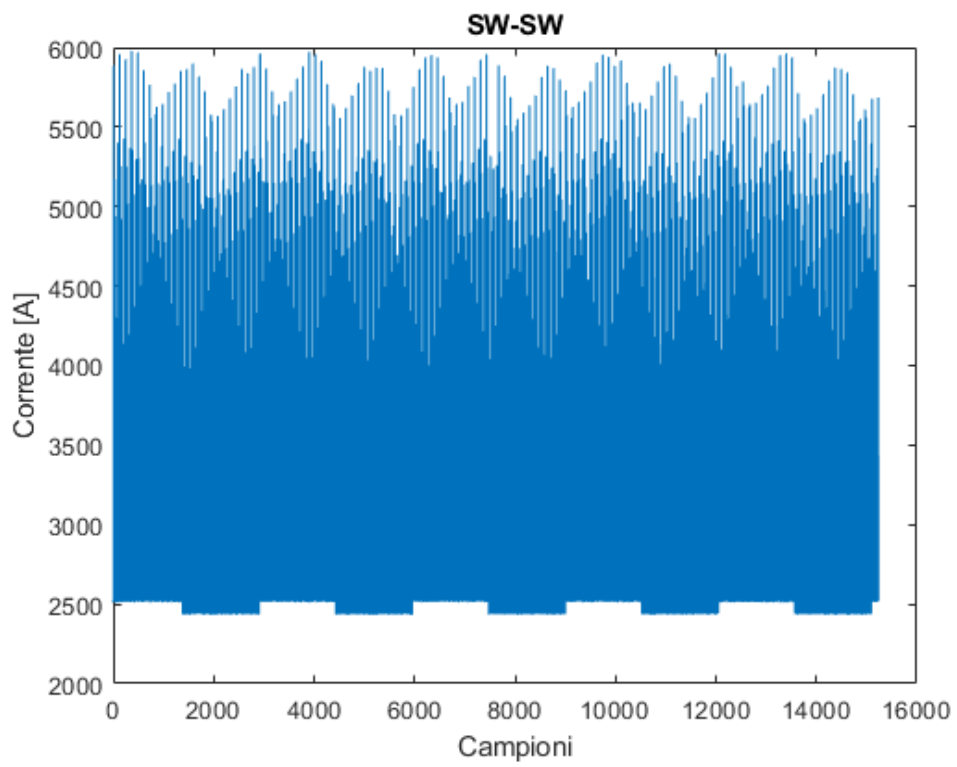
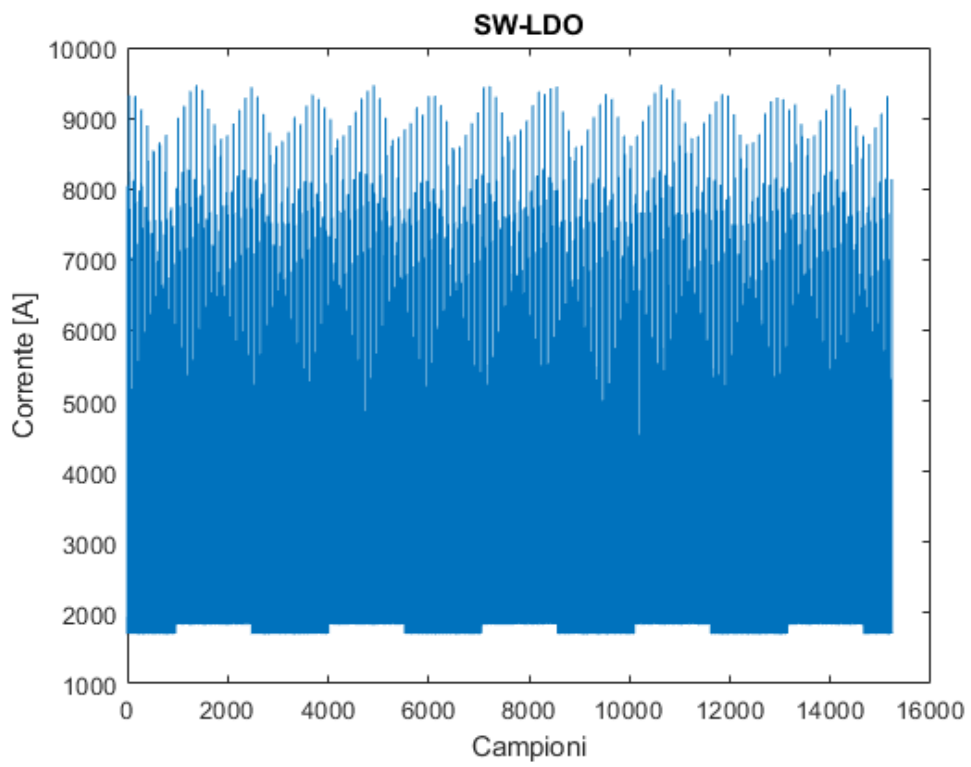
Per effettuare le misurazioni sui consumi di corrente si è interposta fra la batteria e il PCB una schedina contenente un INA226 [4] con resistore di misura da 1Ω , connessa via I²C ad una Raspberry Pi, come mostrato in figura.



L'INA226 è un deviatore di corrente con resistore shunt per il monitoraggio della potenza. Essa permette la lettura diretta della corrente tramite valore di calibrazione e tempo di conversione programmabili, in combinazione con un moltiplicatore interno. Il dispositivo lavora con una alimentazione compresa tra 2.7 V e 5.5 V, consumando una corrente tipica di 330 μ A.

I risultati delle misurazioni dei consumi di corrente in base alle 4 diverse configurazioni dei regolatori sono le seguenti. La tensione di uscita del primo regolatore è lasciata come di default (1.8 V). Si notano poche differenze dalla scelta del primo regolatore, probabilmente a causa della tensione di uscita. L'intervallo di tempo in considerazione è di 10 secondi nel quale la corrente è campionata a circa 1500 Hz.





Infine, sono state effettuate ulteriori misurazioni per stabilire il consumo di corrente medio dalla batteria in diverse configurazioni caratteristiche, considerando $V_{\text{BAT}} = 4.0 \text{ V}$ e $V_{\text{DD}} = 1.8 \text{ V}$.

Modalità	Corrente	Descrizione
OFF	4.1 μA	Tutti i dispositivi spenti
ADVERTISING	0.2 mA	Bluetooth abilitato (intervallo avvertenza 200 ms)
CONNECTED	1.2 mA	Tutti i sottosistemi alimentati
STREAMING	4.6 mA	Streaming dei 3 canali EMG a 800 Hz (0 dBm TX power)

Considerando il valore massimo di corrente erogata dalla batteria da 250 mAh, è possibile stimare una autonomia di circa 50/55 ore prima dell'esaurimento della carica.

9 Conclusioni

Il progetto sviluppato sarà utilizzato come prototipo per il dispositivo da realizzare. Sarà possibile ridurre la dimensione della scheda introducendo ulteriori layers (da 4 a 6) e utilizzare componenti di dimensioni ridotte sfruttando una tecnologia più avanzata. La progettazione del software è già in sviluppo presso il dipartimento; eventuali test possono essere effettuati utilizzando i cinque prototipi realizzati.

Il lavoro svolto in dipartimento ha permesso di sviluppare nuove competenze e consapevolezza nella progettazione hardware e nello studio dei componenti, tramite l'analisi dei datasheet e delle migliori configurazioni per soddisfare le specifiche dell'obiettivo predisposto.

Riferimenti bibliografici

- [1] Eurocircuits. *Making a PCB – PCB Manufacture Step-by-Step*. 2018. URL: <https://www.eurocircuits.com/making-a-pcb-pcb-manufacture-step-by-step/>.
- [2] Fanstel. *Datasheet BT840*. 2018. URL: <https://www.fanstel.com/download-document>.
- [3] Texas Instruments. *Datasheet ADS1293*. 2014. URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1293.pdf>.
- [4] Texas Instruments. *Datasheet INA226*. 2015. URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina226.pdf>.
- [5] Texas Instruments. *Datasheet TPS788*. 2001. URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps788.pdf>.
- [6] Tag-Connect LLC. *Datasheet TC2050-IDC*. 2011. URL: <http://www.tag-connect.com/node/3>.
- [7] Nordic Semiconductor. *Datasheet nRf52840*. 2018. URL: https://infocenter.nordicsemi.com/pdf/nRF52840_PS_v1.0.pdf.
- [8] STMicroelectronics. *Datasheet LSM6DSO*. 2019. URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/lsm6dso.pdf>.
- [9] Linear Technology. *Datasheet LTC4054*. 2003. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/405442xf.pdf>.