



ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

CAMPUS DI CESENA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA ELETTRONICA  
PER L'ENERGIA E L'INFORMAZIONE

# **PROGETTO DI SCHEDA DI INTERFACCIA TRA INVERTER E DSPACE PER CONTROLLO MOTORE**

Tesi di laurea in Conversione Elettromeccanica dell'energia

**Relatore**

Prof. Alberto Bellini

**Correlatrice**

Elena Macrelli

**Presentata da**

Alex Vandi

---

**Sessione III**

**Anno Accademico 2022/2023**

Pag. 1 di 57



## INDICE

<b>1. Prefazione</b> .....	4
<b>2. Sistema elettrico europeo</b> .....	5
2.1 Provvedimenti Europei .....	6
2.2 Consumi famiglia tipo .....	9
2.3 Introduzione ai pannelli fotovoltaici.....	13
<b>3. Sistemi di accumulo dell'energia</b> .....	19
3.1 Stoccaggio dell'energia in batterie .....	20
3.2 Stoccaggio dell'energia del volano .....	22
3.3 Descrizione del Sistema.....	25
<b>4. Progettazione della scheda</b> .....	28
4.1 Introduzione al dSPACE.....	30
4.2 Caratteristiche del dSPACE .....	31
4.3 Progettazione dei componenti della scheda.....	40
4.4 Dimensionamento della scheda.....	39
<b>5. Conclusioni</b> .....	52
<b>Lista Figure</b> .....	54
<b>Bibliografia</b> .....	56
<b>Ringraziamenti</b> .....	57

## 1. Prefazione

L'obiettivo di questa tesi consiste nella progettazione di una scheda in grado di interfacciare i segnali provenienti da un dispositivo dSPACE e da un inverter che comandi un motore elettrico collegato a sua volta ad un volano. Lo scopo del progetto è di immagazzinare l'energia in eccesso prodotta da fonti rinnovabili, per poi usufruirne nel momento di maggior necessità.

Il crescente aumento dell'utilizzo delle energie rinnovabili e la necessità di massimizzare i rendimenti energetici di queste tecnologie hanno dato origine a questa ricerca volta a migliorare le prestazioni di questi sistemi per ridurre gli sprechi di energia.

La presente tesi intende analizzare l'importanza dello sviluppo di sistemi di accumulo, diversi dalle tradizionali batterie al litio o sistemi di stoccaggio di energia tramite volano, presentando un nuovo progetto in grado di garantire un sistema efficiente di minimizzazione delle perdite di energia, in modo tale da sfruttare al meglio le potenzialità delle fonti rinnovabili.

Partendo dalle principali ragioni in merito all'utilizzo delle energie rinnovabili, si andrà a descrivere l'applicazione pratica del progetto, passando per la progettazione della scheda fino ad approfondire la logica sottostante al dSPACE e illustrando la sua connessione ad un inverter per il controllo del motore.

Tale ultima fase risulta infatti essenziale per garantire un sistema efficiente di minimizzazione di perdite energetica e ottimizzazione delle fonti rinnovabili

## **2. Sistema elettrico europeo**

A seguito di un vertiginoso aumento del surriscaldamento climatico, causato principalmente dalle crescenti concentrazioni di gas serra, nel ventunesimo secolo ci si trova a dover implementare nuove soluzioni per la produzione di energia.

In Europa, l'aumento della domanda energetica e la volatilità dei prezzi complicano ulteriormente la situazione, collegando la lotta ai cambiamenti climatici con la gestione delle risorse energetiche.

Il comparto energetico richiede un processo globale di decarbonizzazione, conformemente agli orientamenti esposti nella Strategia Energetica Nazionale (SEN) e nel Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (PNIEC). Questi documenti delineano la progressiva dismissione delle centrali termoelettriche a carbone, con l'obiettivo di pervenire alla loro completa eliminazione, sostituendole con impianti alimentati da fonti quali gas ed energie rinnovabili.

Tuttavia, è essenziale sottolineare la limitata affidabilità delle fonti rinnovabili e l'inefficienza del metodo attuale di trasporto energetico in molte regioni dell'Unione Europea. Questa constatazione spinge a esplorare varie soluzioni per la produzione e lo stoccaggio di energia in maniera più efficiente e sostenibile.

## 2.1. Provvedimenti europei

Con l'entrata in vigore della normativa europea sul clima, il conseguimento dell'ambizioso obiettivo climatico dell'Unione Europea di ridurre le emissioni di almeno il 55% entro il 2030 assume una rilevanza di carattere giuridico. Attualmente, gli Stati membri dell'UE stanno lavorando congiuntamente alla definizione di una nuova legislazione volta a garantire il raggiungimento di tale obiettivo e a rendere l'UE climaticamente neutra entro il 2050.

Il pacchetto normativo denominato "Pronti per il 55%" costituisce un insieme di proposte finalizzate a una rivisitazione e aggiornamento delle normative europee esistenti, nonché all'attuazione di nuove iniziative. L'obiettivo principale è assicurare che le politiche dell'Unione Europea siano pienamente in linea con gli obiettivi climatici concordati dal Consiglio e dal Parlamento europeo

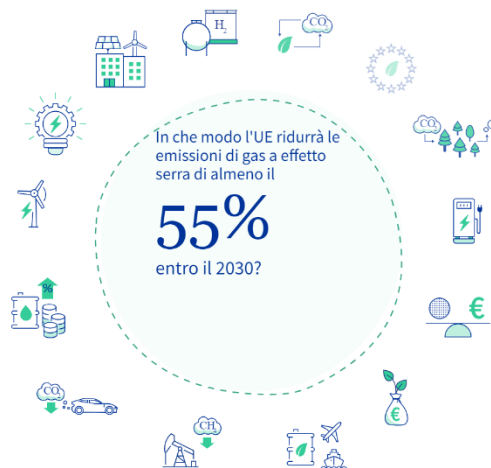


Figura 1 Pacchetto "Pronti per il 55%" entro il 2030

Il pacchetto “Pronti per il 55%” racchiude diversi provvedimenti come:

- Riduzione di metano nel settore dei combustibili fossili. Infatti, all'interno del territorio europeo il settore dell'energia è responsabile di un quinto delle emissioni di metano generato principalmente da estrazione di petrolio, gas e carbone.
- Riduzione di CO<sub>2</sub> per auto e furgoni.

Le autovetture e furgoni producono circa il 15% del totale delle emissioni di CO<sub>2</sub> in UE. La norma prevede che dal 2023 le autovetture di nuova emissione saranno obbligatoriamente a emissione zero.

- Direttiva sulla tassazione dei prodotti energetici.  
L'obiettivo sottostante è aumentare il carico fiscale sui combustibili più inquinanti in modo tale da incentivare i produttori ad adottare pratiche produttive e commerciali sostenibili.
- Risparmio energetico.

In media il risparmio energetico sull'uso finale corrisponderà al 1,49% del consumo totale annuo e raggiungerà 1,9% entro la fine del 2030.

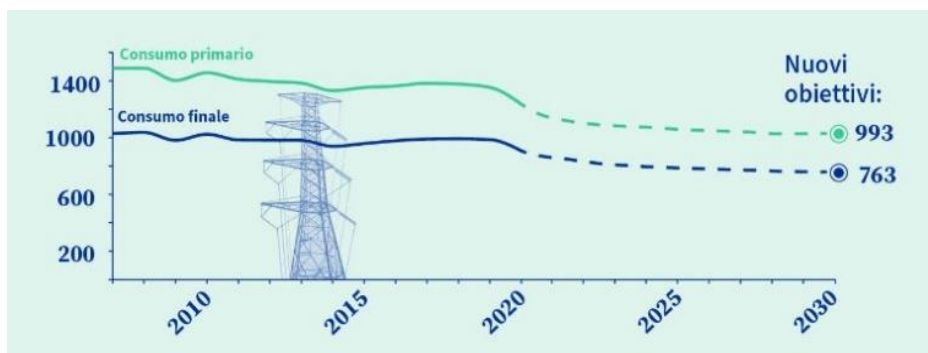
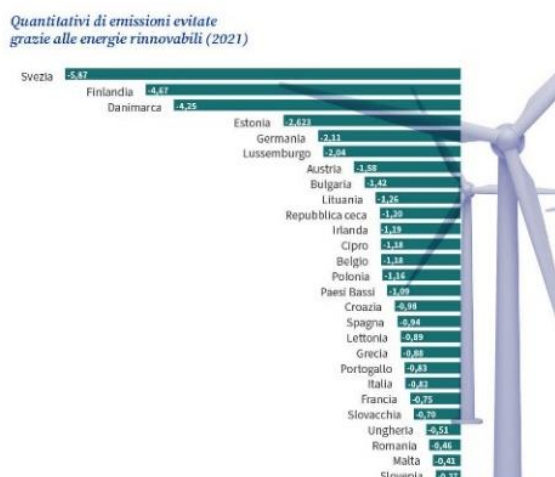


Figura 2 Media consumo energetico dal 2005 ad oggi

- Promozione delle energie rinnovabili

Il piano mira a porre fine alla dipendenza dell'UE dai combustibili fossili russi e promuovere le energie rinnovabili anche accelerando il processo di autorizzazione dei progetti in materia di energia rinnovabili.



*Figura 3 Emissioni evitate nel mondo grazie alle energie rinnovabili*

L'Italia aderisce pienamente alla direzione comunitaria volta a intensificare l'impegno per la decarbonizzazione dei sistemi energetici ed economici europei. In questo processo di transizione, che richiede un deciso acceleramento rispetto al passato, è fondamentale considerare attentamente gli aspetti legati alla sostenibilità economica e sociale, nonché la compatibilità con altri obiettivi di tutela ambientale.

Secondo quanto comunicato dal Ministro dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE), entro il 2030 è prevista un'importante crescita della potenza generata da fonti rinnovabili nel settore elettrico italiano, con un aumento di 93 GW. Tale incremento sarà principalmente attribuibile



all'energia solare fotovoltaica (+30 GW) e all'eolico (+9 GW). Questo risultato si tradurrà in un aumento complessivo dell'energia proveniente da fonti rinnovabili fino a 187 TWh.

Di conseguenza, si prevede una riduzione del 10% nei consumi di energia primaria e una diminuzione totale del 33% delle emissioni di gas serra rispetto ai livelli del 1990. Per conseguire gli obiettivi stabiliti nel settore elettrico entro il 2030, sarà indispensabile implementare nuovi sistemi di accumulo, con particolare enfasi sull'adozione di batterie accoppiate agli impianti fotovoltaici.

## **2.2. Consumi famiglia tipo**

Le abitudini di consumo elettrico all'interno di una famiglia rappresentano un aspetto cruciale per comprendere il panorama energetico domestico. Secondo quanto riportato dall'Istituto Nazionale di Statistica italiano (ISTAT), una famiglia media impiega una vasta gamma di apparecchi elettrici per soddisfare le proprie necessità quotidiane, tra cui elettrodomestici, illuminazione e dispositivi elettronici.

Nel corso del 2020, le famiglie italiane hanno destinato complessivamente 36 miliardi di euro ai consumi energetici delle loro abitazioni, con una spesa media annua di 1.411 euro (circa 118 euro al mese).

Il 41,8% delle famiglie ha dichiarato un aumento della spesa per i consumi energetici rispetto all'anno precedente. Inoltre, la spesa energetica media risulta più elevata all'aumentare delle dimensioni familiari: si va da 1.150

euro per le famiglie monocomponenti a 1.859 euro per quelle con cinque o più membri.

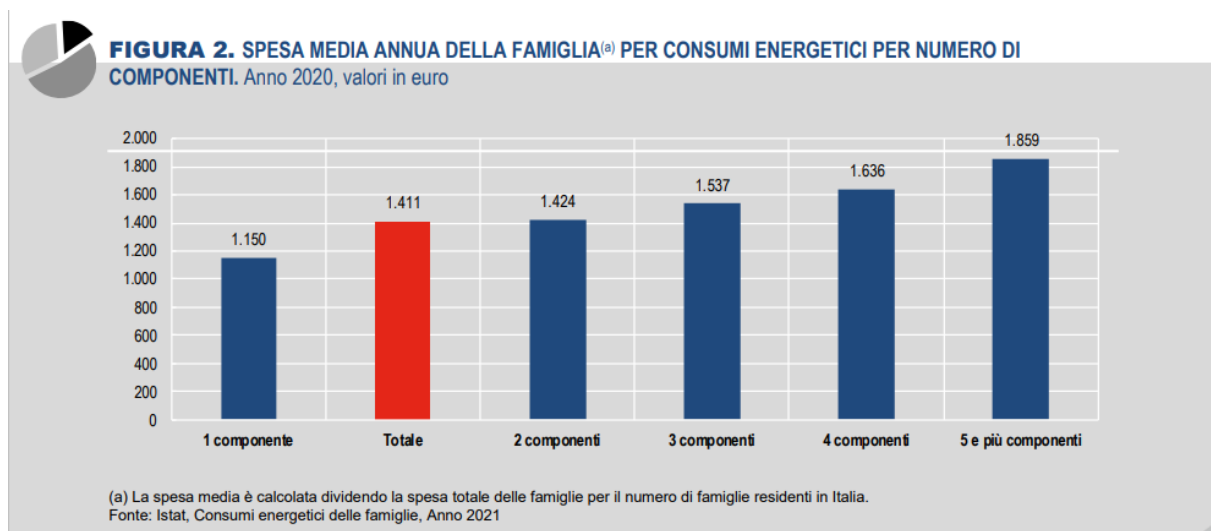


Figura 4 Spesa media annua di una famiglia tipo

Nel caso in cui si volesse approfondire gli aspetti legati ai consumi elettrici, si vedrebbe che una famiglia “tipo”, in Italia, utilizza annualmente circa 2.700 kWh, con una potenza impegnata di 3 kW, quest’ultima differisce dal consumo poiché, la sigla “kWh” è indicatore della quantità di energia assorbibile istantaneamente da un’utenza, mentre “kW” esprime l’effettiva quantità di elettricità consumata dalla casa.

È fondamentale identificare i dispositivi che influiscono maggiormente sul consumo energetico al fine di sostituire quelli obsoleti con apparecchi più efficienti (classificati dalla classe A in su) e adottare comportamenti orientati al risparmio energetico.

Le voci di spesa più rilevanti nella bolletta inerente all’energia sono associate agli elettrodomestici, quali: i frigoriferi e i congelatori che incidono mediamente per il 25%, mentre gli elettrodomestici bianchi, come lavatrici e lavastoviglie, contribuiscono per il 10-15% del totale.

Gli apparecchi di intrattenimento (TV, console di gioco, stereo) e quelli informatici rappresentano complessivamente il 15-20% dei consumi con un'importante riduzione relativa alla spesa per l'illuminazione, avente un'incidenza inferiore al 15% del totale, grazie alla diffusione delle lampadine a risparmio energetico e dei LED.

A completare il quadro generale vi sono i boiler elettrici, considerati obsoleti e inefficienti, insieme ad altri consumi minori quali: phon, piccoli elettrodomestici di casa e vari altri dispositivi elettronici di minori dimensioni, che costituiscono complessivamente la parte restante dei consumi, pari a circa il 30%.

Secondo l'ISTAT, il 74% delle famiglie italiane ha effettuato investimenti negli ultimi 5 anni per ridurre il consumo energetico orientandosi sempre più verso una produzione di energia indipendente basata sulle fonti rinnovabili. Tuttavia, è importante considerare che le fonti rinnovabili non garantiscono una produzione energetica costante al 100%, rendendo essenziale valutare, in base alle fasce orarie, i vari carichi dei dispositivi elettronici utilizzati nelle abitazioni.

Come visto in precedenza possiamo dividere gli elettrodomestici in 5 categorie:

- Frigocongelatori,
- Illuminazione,
- Lavabiancheria e Lavastoviglie,
- Scaldacqua elettrici,
- Personale computer, Tv e Radio.

## Frigocongelatori

Le curve di carico giornaliere medie di questi dispositivi non hanno picchi accentuati poiché i cicli di funzionamento sono ben distribuiti nel momento in cui si consideri un grande numero di apparecchi per un certo numero di giorni.

Si registra un maggior consumo dalle 12 alle 14 e nella prima parte di serata verso le 19 e 21, a seguito dell'apertura e la chiusura di questi ultimi.

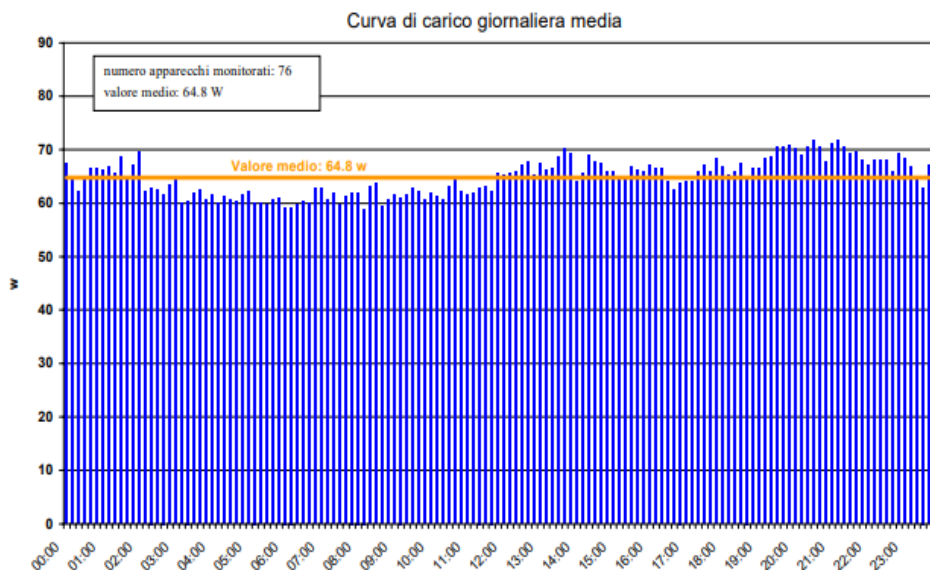


Figura 5 Curva carico giornaliera di Frigocongelatori.

## Illuminazione

L'energia consumata dai sistemi per l'illuminazione è fortemente in diminuzione date le nuove tecnologie a Led. Viene calcolato infatti un valore medio di consumo pari a 43W.

Per i presenti dispositivi di illuminazione, le fasce orarie più in uso ovviamente sono quelle serali dalle 19 alle 23.

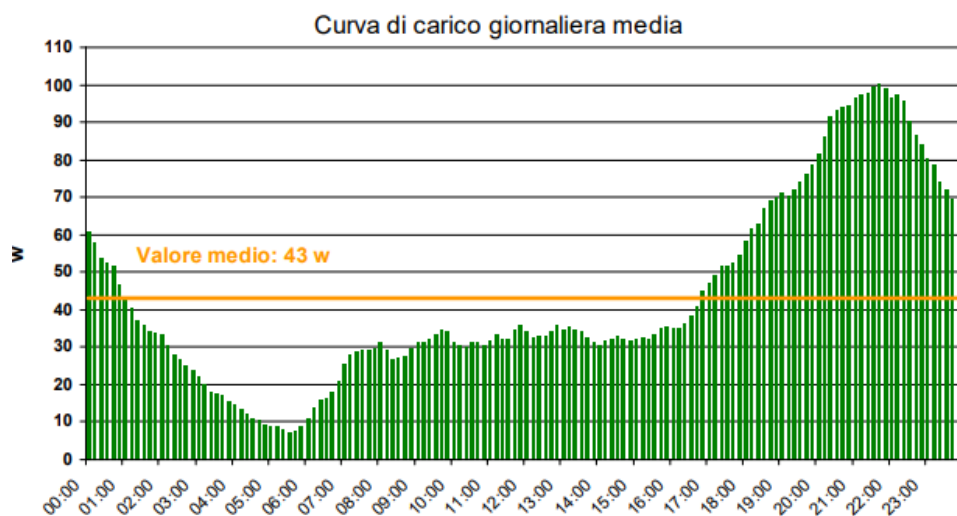


Figura 6 Curva carico giornaliera per illuminazione

## Lavabiancheria e stoviglie

L'andamento della curva media giornaliera della potenza assorbita dalla lavabiancheria e stoviglie evidenzia un picco principale alle 10:00 del mattino (circa 90 W), un secondo picco, più basso, rilevato nell'intervallo orario 15:00-16:00 (circa 45 W) e un incremento della potenza assorbita intorno alle 19:00.

Le curve mostrano che l'uso della lavabiancheria e stoviglie sono prevalentemente utilizzate durante il giorno.

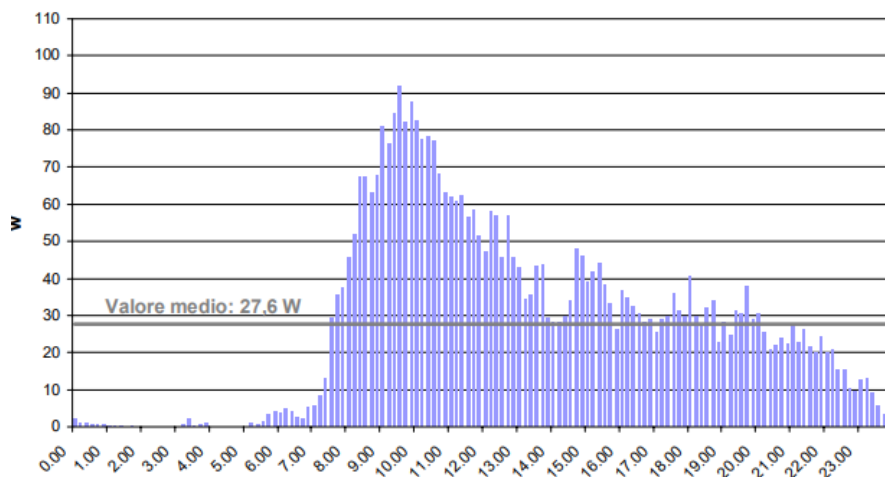


Figura 7 Curva carico giornaliera per lavabiancheria e stoviglie

## Scalda acqua

La potenza dei boiler elettrici varia tra 1050 W (valore minimo) e 1435 W (valore massimo), con un valore medio di 1255 W. La curva di carico di tali boiler evidenzia chiaramente due picchi: uno intorno alle 9:00 e l'altro intorno alle 21:00, con una potenza media della curva di carico di 194 W.

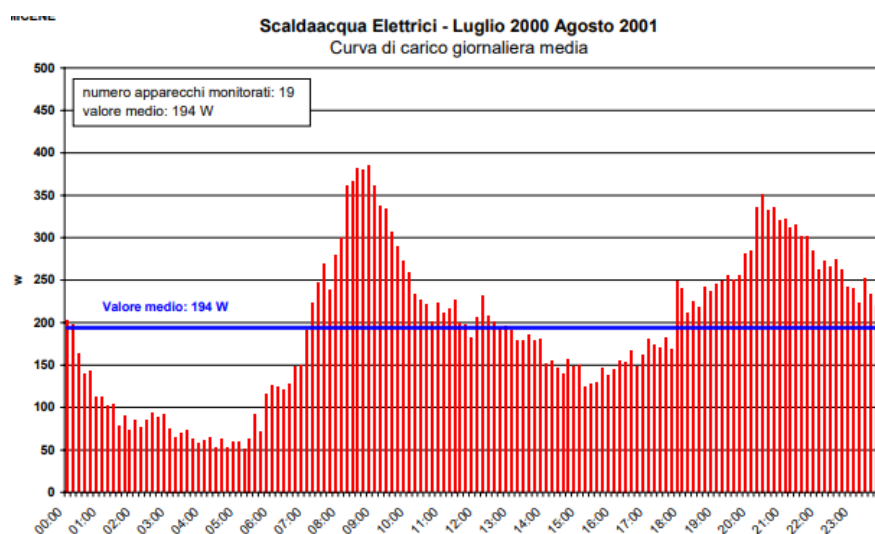


Figura 8 Curca carico giornaliera per lavabiancheria e stoviglie.

## Componenti Audiovisivi

Il consumo medio di potenza di un sito audiovisivo durante l'uso è di 160 W con picchi di valore massimo registrato pari a 305 W e un valore minimo, associato solo alla presenza di un impianto Hi-fi, di 40 W.

La curva di carico orario medio per le postazioni monitorate durante l'intera campagna di misurazioni mostra un picco nella richiesta di potenza alle 19:00.

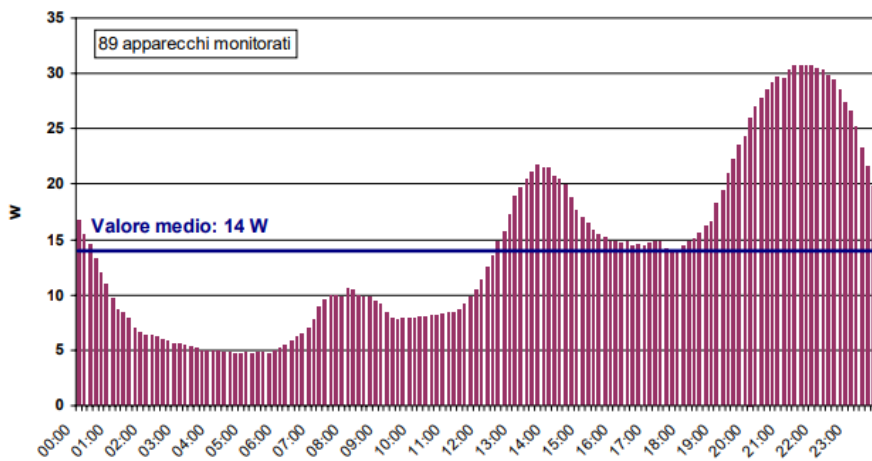


Figura 9 Curva carico giornaliera per dispositivi audiovisivi

## Computer e Affini

I personal computer hanno conosciuto una larghissima diffusione negli ultimi anni, comportando un aumento non trascurabile del consumo di energia elettrica nel settore residenziale. Nella campagna di misure sono state monitorate 57 postazioni di lavoro che comprendono, nella maggior parte dei casi, l'unità centrale del PC, un monitor, una stampante e un modem.

Il consumo medio annuo per i personal computer è pari a 132 kWh/anno con un picco intorno alle 19:00.

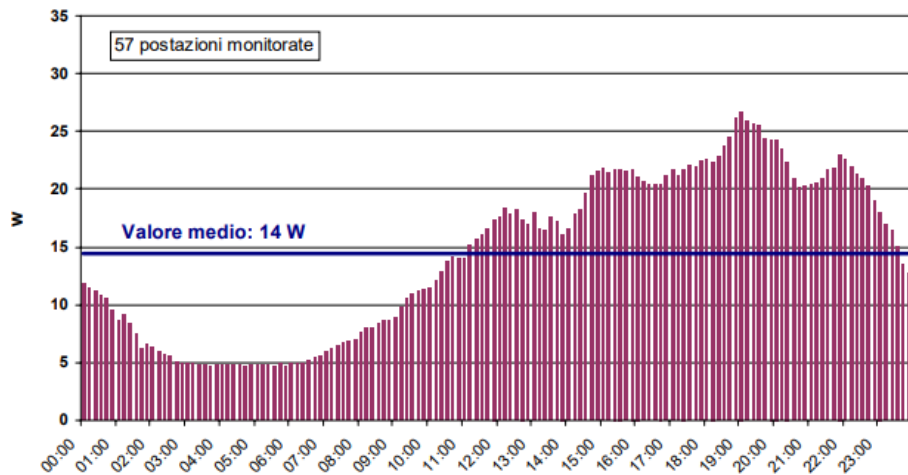


Figura 10 Curva carico giornaliera per computer e affini

### 2.3. Introduzione ai pannelli fotovoltaici

Un impianto fotovoltaico costituisce un sistema elettronico specializzato nella conversione dell'energia solare in energia elettrica utilizzabile per ogni diverso uso.

Tali impianti possono variare da applicazioni residenziali con potenze inferiori a decine di kilowatt (kW) ad applicazioni industriali con potenze fino a centinaia di megawatt (MW). Attualmente, la maggior parte degli impianti fotovoltaici è collegata alla rete elettrica (grid-connected), mentre gli impianti autonomi rappresentano una piccola percentuale del mercato (off-grid).

La distinzione fondamentale tra gli impianti grid-connected e quelli off-grid risiede nella loro connessione alla rete di distribuzione nazionale poiché, i primi non richiedono sistemi di accumulo di energia in quanto integrati con la rete nazionale mentre i secondi dispongono di un sistema di stoccaggio energetico e operano in modo autonomo.

Diversamente a quanto accade per gli impianti di “grid-connected”, i quali rilasciano l’energia creata in eccesso direttamente sulla rete e nei momenti di insufficienza energetica richiedono la stessa alla rete, gli impianti “off-



grid” hanno la capacità di immagazzinare l’energia creata in eccesso all’interno di batteria e di poterla ri-utilizzare nei momenti di insufficiente produzione, in modo tale da non sprecare nessun momento di up e down energetico.

Questo approccio, come evidenziato, garantisce un utilizzo continuo anche in assenza di connessione alla rete principale.

Gli impianti fotovoltaici sono costituiti da diversi componenti:

- Pannelli fotovoltaici: dispositivi utilizzati per trasformare l’energia solare in energia elettrica;
- Inverter: un dispositivo che trasforma la corrente continua prodotta dal pannello in corrente alternata;
- Quadro di interfaccia: un dispositivo che permette la comunicazione dell’impianto con la rete.
- Sistema di accumulo dell’energia: utilizzate per immagazzinare l’energia in eccesso.

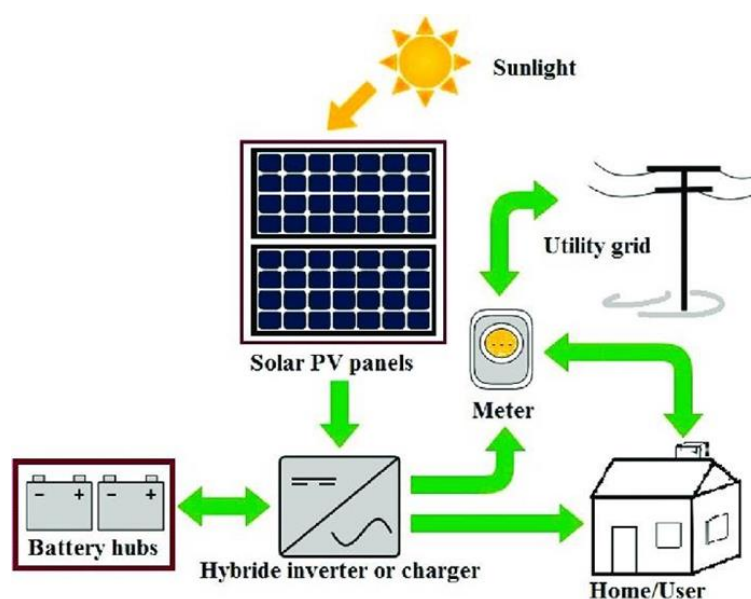


Figura 11 Sistema di un impianto fotovoltaico

Un pannello fotovoltaico è un dispositivo costituito dall'unione di più celle fotovoltaiche in grado di trasformare la radiazione solare in energia elettrica.

Nel corso del tempo, sono state adottate diverse tecnologie per la realizzazione di queste celle solari, ma la più diffusa in grado di rappresentare un equilibrio ottimale tra efficienza, costi e limitato deterioramento nel tempo, è il Silicio cristallino (c-Si).

Un pannello solare è costituito dal collegamento in serie e in parallelo delle celle c-Si le quali saranno poi successivamente integrate all'interno di un modulo solare che ne garantisca protezione da agenti atmosferici.

I moduli vengono collegati elettricamente attraverso delle linee conduttive in alluminio e montati su una struttura portante, dove vanno a costituire una stringa di moduli, denominata per l'appunto "pannello fotovoltaico".



*Figura 12 Pannello solare di una abitazione*

Incrementando il numero di celle fotovoltaiche in parallelo aumenteremo la corrente erogata dal pannello. Disponendo più moduli solari in parallelo si è invece in grado di incrementare la tensione erogata dallo stesso.

L'efficienza del pannello dipende fortemente dalla quantità di luce solare presente in quel momento.

Quest'ultima cambia al variare dell'ora della giornata, dalla declinazione solare e dalle condizioni metereologiche. Un fenomeno da non sottovalutare è la temperatura; la quale modifica le caratteristiche di conducibilità dei semiconduttori, quindi le prestazioni della cella stessa.

La produzione elettrica delle celle fotovoltaiche è inoltre molto sensibile allo Shading (ombreggiamento). Quando una piccola parte di una cella solare è ombreggiata, la potenza generata dal pannello subisce una drastica diminuzione a causa di un cortocircuito interno.

Gli elettroni prodotti dalla sezione esposta alla luce solare utilizzano la parte in ombra per invertire il proprio percorso, generando di conseguenza una corrente di uscita complessivamente ridotta. Pertanto, diventa essenziale progettare sistemi in grado di immagazzinare l'energia durante le ore di picco e rilasciarla nei momenti in cui il pannello solare non è in grado di generarla.

### **3. Sistemi di accumulo dell'energia**

Come precedentemente evidenziato, la principale problematica associata alle fonti rinnovabili riguarda la produzione non costante di energia, strettamente vincolata alle condizioni climatiche, generando così una crescente necessità di sviluppare sistemi efficienti per l'accumulo energetico.

Secondo uno studio del 2021 condotto su 42 Paesi, nessuno di essi, inclusa l'Italia, sarebbe in grado di soddisfare completamente la domanda interna di energia solamente attraverso risorse solari ed eoliche, in assenza di sistemi di stoccaggio.

I sistemi attualmente disponibili risultano spesso complessi, costosi, poco efficienti e, soprattutto, insufficienti. La capacità di stoccaggio dell'energia su scala globale è attualmente di circa 2,2 Terawattora (TWh), tuttavia, per far fronte alle esigenze, sarebbe necessario raggiungere almeno 1 Petawattora (PWh), ovvero circa 500 volte la capacità attuale.

Nonostante le batterie al litio rappresentino attualmente uno dei principali sistemi di accumulo, è essenziale esaminarne attentamente gli aspetti critici, inclusi l'impatto ambientale e le limitazioni di capacità.

Infatti, nell'ottica di ottimizzare lo stoccaggio energetico, l'impiego del volano per l'accumulo di energia emerge come una prospettiva interessante, poiché, l'approccio basato sull'immagazzinamento dell'energia cinetica, mira a superare alcune delle sfide incontrate con le tradizionali batterie, aprendo nuove possibilità per garantire una fornitura energetica più stabile e sostenibile.

### **3.1. Stoccaggio dell'energia in Batterie.**

Il fabbisogno medio di elettricità di una famiglia è stimato a circa 3.000 kWh/anno, il che, suddiviso su base giornaliera, equivale a circa 8,2 kWh al giorno (ovvero 3.000 diviso 365 giorni), rappresentabile anche come “consumo giornaliero medio” di una famiglia per kWh/giorno.

Tuttavia, considerando che almeno il 50% dei consumi domestici si verifica di sera o di notte, quando l'impianto fotovoltaico non è operativo, diventa imperativo accumulare circa la metà dell'energia, ovvero in termini numerici 4 kWh/giorno, per garantire un adeguato margine di autonomia dalla rete.

Questa considerazione diventa particolarmente rilevante nel contesto dell'installazione di pannelli fotovoltaici in un'abitazione, evidenziando

l'importanza di bilanciare la produzione e la domanda energetica, come precedentemente affrontato nel capitolo 2 riguardante l'utilizzo della quantità di energia.

Di solito, le batterie di accumulo sono dimensionate in base alla potenza dell'impianto fotovoltaico:

- Per un impianto da 3 kW si utilizzano batterie al litio di circa 5 kWh, abbinandole a un inverter da 3 kW.
- Per un impianto da 6 kW si scelgono batterie al litio con capacità di almeno 9,6 kWh (fino a 14 kWh).
- Per un impianto da 12 kW si opta per batterie al litio da circa 20-40 kWh.

I prezzi base per le batterie al litio si aggirano attorno a € 900 - € 1.200 per kWh. La vita stimata di una batteria è calcolata in termini di cicli di ricarica, con una stima media di circa 10.000 cicli di ricarica (fonte: Sorgenia).



*Figura 13 Batteria al litio per pannello fotovoltaico*

### 3.2. Stoccaggio dell'energia del volano

Il concetto di conservazione dell'energia tramite volano, è considerata un'alternativa interessante alle attuali batterie al litio per ridurre l'inquinamento.

Il Flywheel Energy Storage System (FESS), funzionando come dispositivo elettromeccanico, sfrutta un volano collegato a una macchina elettrica, la quale accumula energia cinetica rotazionale proveniente da fonti energetiche rinnovabili, come per esempio da pannelli solari.

Il FESS si presenta nelle vesti di una batteria inerziale capace di accumulare notevoli quantità di energia in un oggetto di piccole dimensioni e di rilasciare grosse quantità di potenza in pochissimo tempo.

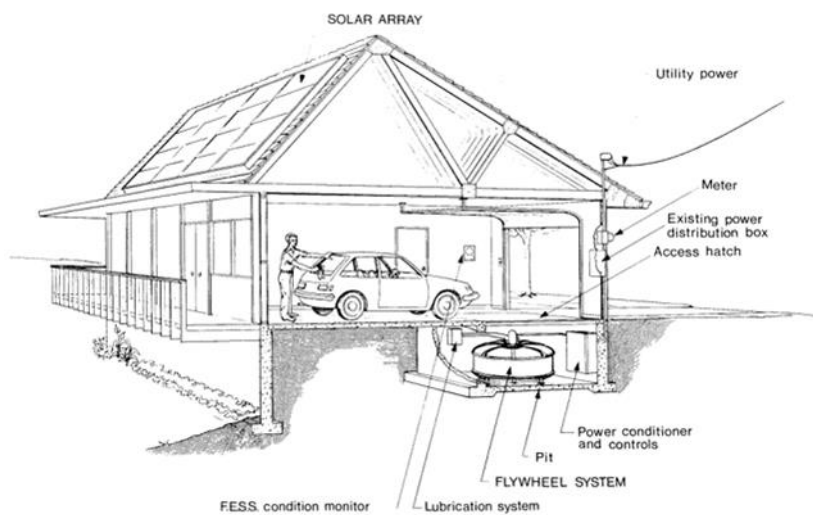


Figura 14 Modello concettuale di un sistema di accumulo di energia a volano

Il volano del FESS è costituito da un rotore che rimane sospeso grazie alla forza magnetica, inserito all'interno di una camera a vuoto di forma

cilindrica e collegato direttamente ad un motore elettrico avente la capacità di lavorare esprimendo due/2 modalità: motore e generatore.

La sospensione magnetica del volano è necessaria per controbilanciare gli attriti dovuti alla sua elevata velocità rotazionale, che può raggiungere frequenze di lavoro di 333-833 Hz. L'energia cinetica immagazzinata nel rotore è determinata dal momento di inerzia e dalla velocità di rotazione che viene gestita attraverso un sistema, il quale regola la velocità del rotore, immagazzinando energia nei momenti di sovrapproduzione e rilasciandola nei momenti di sottoproduzione.

La tecnologia a volano presenta numerosi vantaggi, tra cui un'elevata efficienza energetica dovuta alla capacità di immagazzinare energia in un sistema che opera in condizioni di vuoto, riducendo al minimo le perdite energetiche e garantendo bassi costi di manutenzione.

Questa tecnologia, caratterizzata da una pronta capacità di risposta, consente al volano di accelerare o decelerare rapidamente, permettendo di invertire il flusso di produzione energetica alternativamente da accumulo a generatore. Uno dei benefici più rilevanti associati all'uso dei volani è la riduzione dell'impatto ambientale poiché, evitando l'impiego delle tradizionali batterie chimiche, si contribuisce significativamente alla diminuzione dell'inquinamento.

Tuttavia, questo sistema presenta altresì alcuni svantaggi sia in ambito di raffreddamento di sistema sia in campo di sicurezza che conducono ad un perfezionamento del sistema in generale.

Infatti, in caso di rottura dell'involucro che contiene il volano a vuoto, potrebbe verificarsi lo scarico completo dell'energia cinetica immagazzinata in maniera esplosiva, creando grossi danni al sistema

stesso. Tali problematiche risultano risolvibili attraverso un'adeguata progettazione e con una scelta ottimale di materie prime utilizzate per la costruzione dell'involucro di protezione, limitando in tal modo gli effetti negativi.

Un ulteriore parametro che potrebbe essere efficientato risulta quello legato al periodo di tempo durante il quale il sistema, scollegato dal sistema di carico e dalla fonte di energia, sia in grado di mantenere la sua energia cinetica.

L'energia cinetica immagazzinata nel rotore corrisponde al momento di inerzia  $J$  e al quadrato della sua velocità di rotazione  $\omega$  [rad/s], come rappresentato nelle formule seguenti:

$$E_{cinetica} = \frac{1}{2}J\omega^2$$

*Figura 15 Formula energia cinetica immagazzinata*

*J = Momento d'inerzia,  $\omega$  = Velocità di Rotazione*

$$J = \frac{4\rho R^4 h}{2}$$

*Figura 16 Formula del momento d'inerzia.*

*$\rho$  = equivale alla densità del materiale*

*R = equivale al raggio del volano*

*H = equivale all'altezza del volano*



### 3.3. Descrizione del Sistema

Il sistema sarà composto da quattro nodi, tutti collegati allo stesso bus DC e in comunicazione tra di loro. Saranno presenti due fonti di energia: un pannello fotovoltaico, che erogherà una potenza ( $P_{pv}$ ) durante la giornata, e la rete elettrica ( $P_{grid}$ ) con duplice funzione: fornirà potenza nel momento in cui, sia nel pannello che nel “Mechstore”, vi sarà un calo di energia, e, assorbirà potenza, nel momento in cui ci sarà una sovrapproduzione di quest'ultima.

Inoltre, sarà presente il carico che assorbe potenza ( $P_{load}$ ), rappresentante di tutti gli apparecchi elettronici che utilizziamo in casa.

Infine, il volano, che, come precedentemente illustrato, è in grado di immagazzinare energia proveniente dai pannelli solari e restituirla nei momenti in cui quest'ultimi non riescano a produrne a sufficienza.

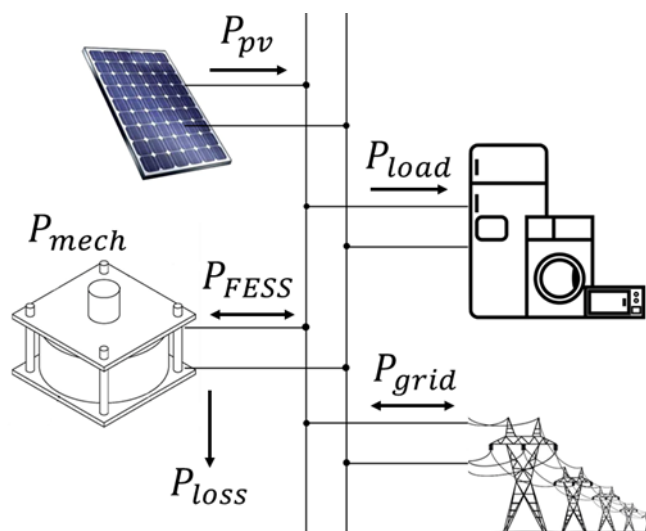


Figura 17 Descrizione del sistema

Il nucleo principale del modello è il “sistema logico” che controlla il flusso bidirezionale di potenza tra tutti i nodi.

Tale sistema si basa sul calcolo della “potenza netta disponibile”, ottenuta dalla differenza tra la potenza generata e quella richiesta dal carico, e sulla valutazione della velocità del volano, dal quale valutiamo se l'energia può essere immagazzinata o deve essere prelevata dallo stesso.

A seconda della situazione, la macchina elettrica può agire come motore, come generatore o, semplicemente, rimanere inattiva per immagazzinare l'energia.

L'intervallo di velocità del volano presenta un limite superiore, corrispondente alla velocità nominale della macchina, ma anche un limite inferiore, il quale viene fissato tenendo conto del compromesso tra massima capacità ed aumento della coppia nominale. Durante il funzionamento, il volano non è mai autorizzato a ridurre la propria velocità inferiormente rispetto al 25% del valore massimo determinato, rendendo pertanto necessario l'alimentazione dello stesso anche in periodi di inattività, eventualmente ricorrendo anche all'acquisto di energia dalla rete.

Sebbene possa sembrare controintuitivo, questo approccio evita avviamenti frequenti e di conseguenza, consente una coppia nominale inferiore. Di conseguenza, la capacità del volano può essere espressa come:

$$C = E_{max} - E_{min} = \frac{1}{2}J(\omega_{max}^2 - \omega_{min}^2)$$

*Figura 18 Formula capacità del volano.*

*$E_{max}$  equivale all' energia massima del sistema.*

*$E_{min}$  equivale all' energia minima del sistema.*

*$\omega_{max}$  equivale alla velocità massima del volano.*

*$\omega_{min}$  equivale alla velocità minima del volano*

## 4 Progettazione della scheda

Il presente capitolo introduce lo scopo principale della tesi, ovvero la realizzazione di una scheda di interfaccia che faciliti la comunicazione tra il dSPACE e l'inverter per la gestione ottimale di un motore.

Il dSPACE, essendo un dispositivo programmabile avente la possibilità di controllo in tempo reale, permette una gestione avanzata dei processi.

I segnali provenienti da dSPACE e provenienti dall'Inverter, quest'ultimo che a sua volta controlla il motore mediante la tecnica di modulazione di larghezza d'impulso (PWM), data la loro diversità dovranno essere interfacciati. Questo avverrà grazie alla progettazione e alla creazione di una scheda che adatti e trasformi i vari dispositivi permettendo di regolare finemente la potenza erogata al motore e ottimizzando pertanto le prestazioni complessive del sistema.

Ciò permetterà al motore di essere utilizzato in due modalità: sia come "motore" sia come "generatore" di Elettricità.

I segnali provenienti dal dSPACE saranno prevalentemente digitali, mentre quelli provenienti dall'inverter saranno sia analogici e digitali.

Pertanto, sarà necessario inserire all'interno della scheda un convertitore.

I segnali che dal dSPACE dovranno essere collegati all'inverter sono:

- 12 pin destinati alla PWM.
- 1 pin per il reset.

Tutti di natura digitale.

I segnali che dall'inverter dovranno essere collegati al dSPACE sono:

- 2 segnali digitali relativi ai fault dei moduli

Vari segnali analogici suddivisi in:

- 6 correnti di fase.

- 2 correnti di bus.

- 1 tensione di bus.

- 2 segnali relativi alle temperature dei moduli.

#### **4.1 Introduzione al dSPACE**

Il dSPACE rappresenta un sistema compatto, facile e sicuro da utilizzare. Concepito per essere impiegato agevolmente in un ambiente di laboratorio facilitando l'esecuzione di simulazioni, presenta una caratteristica distintiva: permette la connessione diretta alla rete elettrica senza la necessità di alimentare supplementari o trasformatori.

Offre interfacce standard per il collegamento di dispositivi esterni quali connettori Ethernet e USB, mentre, relativamente alla generazione e misurazione dei segnali I/O, la scheda mette a disposizione canali di ingresso e uscita sia analogici che digitali.

All'interno il sistema incorpora una logica programmabile che, se connessa a un PC tramite il software Simulink, unitamente ad una programmazione

basata su blocchi, consente di configurare facilmente il sistema secondo le necessità specifiche del progetto da testare.



Figura 19 Il dSPACE.

La versione specifica che utilizzeremo è la MicroLabBox BNC, la quale offre connettori BNC come principale tipo di connessione sul pannello superiore.

La versione specifica che utilizzeremo è la MicroLabBox BNC, la quale offre connettori BNC come principale tipo di connessione sul pannello superiore.

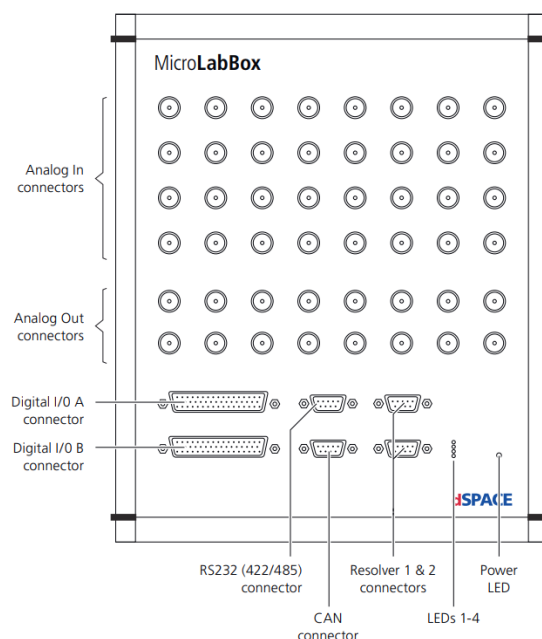


Figura 20 MicroLabBox con BNC.

Al suo interno questo dispositivo si compone di due schede principali:

A) La prima è la DS1202, scheda base di MicroLabBox, che si avvale della tecnologia **Frescale Power Architecture®** e utilizza il processore **Frescale P5020** per le operazioni in tempo reale. Tale scheda fornisce le funzionalità di comunicazione, elabora i modelli in tempo reale e interagisce con la scheda I/O tramite il bus locale.

Permette di controllare l'interfaccia host per trasferire dati di Runtime da e verso il PC, l'interfaccia Ethernet per stabilire comunicazioni basate su Ethernet con dispositivi esterni attraverso i protocolli UDP/IP o TCP/IP, e l'interfaccia USB per accedere a dispositivi di archiviazione USB, consentendo la memorizzazione dei dati di registrazione e/o l'avvio di applicazioni.

B) La seconda scheda è la DS1302, complementare al modulo FPGA, che insieme forniscono le funzionalità I/O di MicroLabBox.

Questa scheda include tutte le connessioni I/O analogiche e digitali, collegamenti con la porta RS232 e la porta CAN, nonché diverse uscite per l'alimentazione dei sensori. Al suo interno, sono presenti convertitori analogico/digitali e viceversa, così come segnali di ingresso e uscita temporizzati per la generazione di segnali PWM. Le funzionalità I/O di MicroLabBox sono rese flessibili mediante l'implementazione in codice FPGA, con il modulo FPGA sulla DS1302 che viene automaticamente programmato con il firmware standard FPGA I/O all'atto del caricamento di un'applicazione in tempo reale. MicroLabBox fornisce interrupt per controllare l'esecuzione delle routine di servizio di interruzione a diversi livelli del codice del programma.

## 4.2 Caratteristiche del dSPACE

Nell'ambito della simulazione dei segnali, il sistema MicroLabBox si distingue come strumento estremamente versatile per la prototipazione rapida. Questo dispositivo offre una gamma di funzionalità e configurazioni adattabili a diverse esigenze.

MicroLabBox è dotato di due distinti circuiti per l'alimentazione dei sensori, assicurando così un'elevata flessibilità operativa; il primo circuito assicura una tensione di uscita costante a 12 V DC, risultando ideale per quei dispositivi che necessitano di una stabilità energetica garantita, il secondo propone una soluzione adattabile, con una tensione regolabile che varia da 2 a 20 V DC, offrendo così la possibilità di soddisfare un ampio spettro di requisiti sensoriali.

Sul fronte della conversione dei segnali, il dSPACE si distingue per la presenza di due unità A/D con specifiche tecniche distintive.

- Unità ADC Classe 1: è composta da 24 convertitori A/D indipendenti, ciascuno dotato di ingressi differenziali. Si caratterizza per una risoluzione di 16 bit e una frequenza di campionamento di 1 MSPS, permettendo l'analisi di fino a 8192 valori analogici attraverso modalità operative sia in burst che continue.

Inoltre, ogni canale dispone di un buffer oscillante, che facilita la separazione tra il buffer di scrittura e quello di lettura, ottimizzando così il flusso dei dati. Per configurare un canale dell'Unità ADC Classe 1, è necessario implementare due tipi di trigger: il "trigger burst" e il "trigger di conversione".

Il "trigger burst" innesca una sequenza di conversioni note come "burst di conversione", selezionabile mediante l'assegnazione di una sorgente

di trigger specifica, come una linea trigger, al canale del convertitore. Analogamente, il trigger di conversione avvia singole conversioni A/D basate su un risultato di conversione per trigger, richiedendo l'assegnazione di una sorgente appropriata, come un timer di canale, per la sua attivazione.

Questa configurazione dual-trigger assicura un controllo preciso e flessibile del processo di conversione, fondamentale per applicazioni che richiedono elevata accuratezza e affidabilità nel trattamento dei segnali.

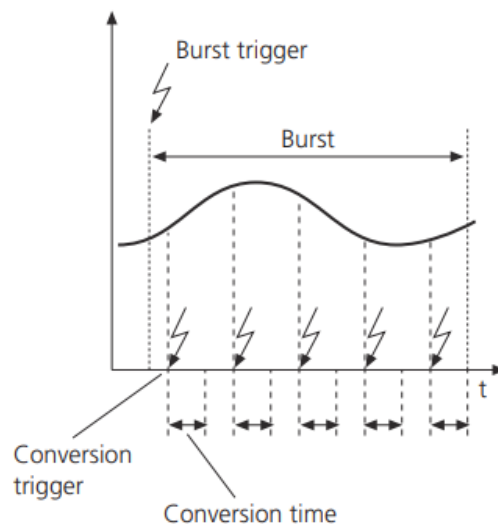


Figura 21 Configurazione di un canale del ADC classe 1.

- Unità ADC Classe 2: composta da 8 convertitori A/D paralleli, tutti dotati di ingressi differenziali. Si caratterizza per una risoluzione di 14 bit e una notevole frequenza di campionamento di 10 MSPS, gestendo un ampio intervallo di tensione in ingresso da -10 a +10 V. I segnali ricevuti vengono convertiti continuamente, aderendo strettamente alla frequenza di campionamento predefinita, e i dati risultanti sono accessibili attraverso un registro dedicato.



Parallelamente, il sistema MicroLabBox offre due distinte unità di Bit I/O, ciascuna progettata per specifiche esigenze di interfaccia digitale. L'unità DIO Classe 1 si rivolge alla gestione dei canali I/O digitali single-ended, con 48 canali bidirezionali suddivisi in tre porte da 16 canali ciascuna.

Questi canali, configurabili individualmente come ingressi o uscite, permettono una lettura flessibile, sia di un singolo canale sia dell'intero gruppo, integrando anche la possibilità di applicare un filtro antirumore per escludere segnali di durata inferiore a un intervallo predefinito.

D'altra parte, l'unità DIO Classe 2 si concentra sui canali I/O digitali differenziali, offrendo 12 canali bidirezionali anch'essi configurabili come ingressi o uscite. Questa configurazione trova particolare applicazione nelle funzionalità avanzate di controllo del motore elettrico.

Nel contesto del sistema MicroLabBox, le interruzioni hardware relative alla funzione Bit I/O rivestono un ruolo fondamentale nell'attivazione di processi gestiti attraverso interruzioni dei processi interni. Queste interruzioni sono responsabili dell'attivazione di specifiche operazioni all'interno del sistema, sfruttando linee di trigger per inviare segnali a consumatori di trigger, sia interni che esterni. La configurabilità del sistema MicroLabBox in questo contesto consente di generare interruzioni, segnali di trigger, o entrambi, in base alle necessità progettuali. L'attivazione di tali eventi può avvenire mediante fronti di salita, discesa o entrambi, evidenziando così l'eccezionale adattabilità e la vasta gamma di applicazioni supportate da questa piattaforma di prototipazione.

Il DSPACE dispone di uscite che consentono la generazione di segnali PWM per il controllo di motori elettrici. La presente funzionalità è affidata

all'unità DIO di Classe 1, che garantisce l'accesso ai canali I/O digitali in configurazione single-ended permettendo di configurare fino a 48 canali bidirezionali per l'emissione di segnali PWM, organizzati in tre porte contenenti ciascuna 16 canali.

La tensione di uscita può essere regolata su tre livelli: 2,5 V, 3,3 V, 5,0 V.

Un segnale di modulazione di larghezza di impulso (PWM) è caratterizzato da due parametri fondamentali: il suo periodo e il suo Duty Cycle. Quando si rende necessario aggiornare questi valori, nell'ipotesi in cui lo stesso avvenga in modalità sincrona, tali aggiornamenti sono applicati all'occorrenza del prossimo fronte di salita del segnale di uscita PWM. La figura seguente mostra un esempio di come viene aggiornato il Duty Cycle in modalità di aggiornamento sincrono.

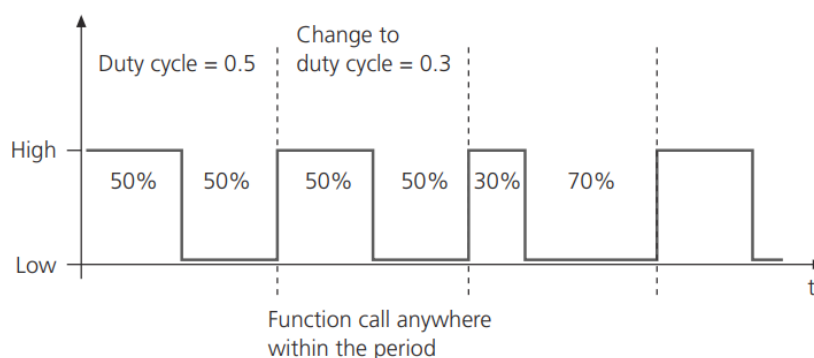


Figura 22 PWM sincrono.

L'aggiornamento dei valori relativi al segnale di modulazione di larghezza di impulso (PWM) può essere effettuato anche mediante un approccio asincrono. In particolare, qualora si intenda ampliare il Duty Cycle vigente e, nel caso in cui tale aggiornamento avvenga durante una fase ad alto livello del segnale, l'aggiornamento dei valori verrà eseguito immediatamente.

In caso contrario, se l'aggiornamento è effettuato durante una fase a basso livello, l'applicazione dei nuovi valori sarà posticipata al ciclo di segnale successivo.

Nell'eventualità in cui si abbia necessità di diminuire il Duty Cycle, la tempistica dell'aggiornamento sarà inoltre influenzata dalla posizione temporale corrente all'interno del periodo del segnale. Le illustrazioni seguenti esemplificano il processo di aggiornamento del ciclo di lavoro in una configurazione di aggiornamento asincrono, dimostrando visivamente le dinamiche di tale procedura.

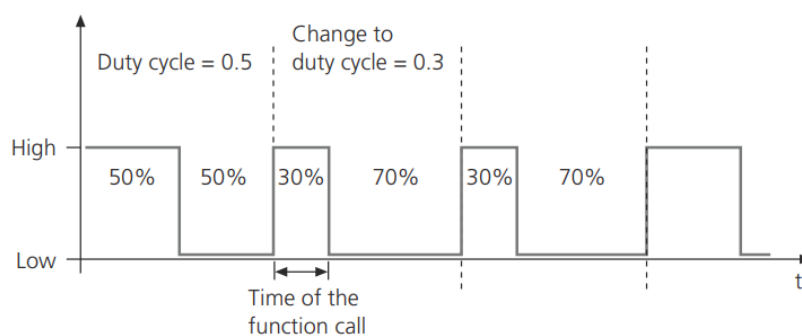


Figura 23 PWM asincrono.

Qualora l'invocazione della funzione di aggiornamento avvenga durante la fase ad alto livello, e ciò si verifichi prima del raggiungimento della conclusione del nuovo intervallo ad alto livello previsto, l'aggiornamento si verifica entro lo stesso periodo di riferimento.

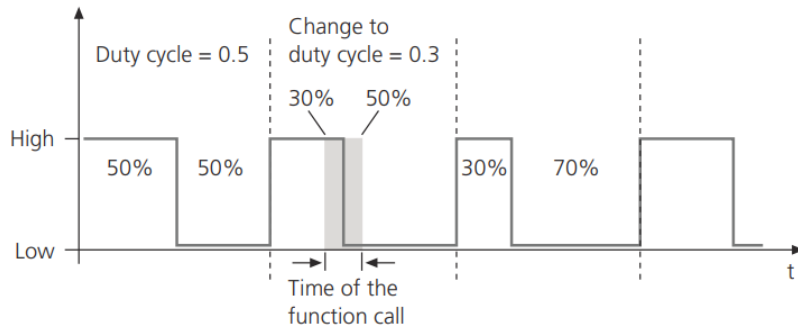


Figura 24 PWM asincrono con aggiornamento a livello alto.

Le capacità del dSPACE includono diverse funzionalità relate al segnale PWM:

- 1) Misurazione della Frequenza e del Ciclo di Lavoro dei Segnali PWM: questa applicazione, basata sull'unità DIO di Classe 1, permette di determinare la frequenza e il ciclo di lavoro dei segnali PWM su un canale di ingresso. Le frequenze misurabili variano da 0,5 Hz a 10 MHz, con una risoluzione temporale di 10 ns.
- 2) Generazione di Segnali a Impulsi: utilizzando l'unità DIO di Classe 1, è possibile generare segnali a impulsi su un canale di uscita digitale. Anche in questo caso, 48 canali bidirezionali possono essere configurati per tale scopo, suddivisi in tre porte da 16 canali ciascuna. L'ampiezza dell'impulso e il livello di tensione di uscita sono regolabili, con l'ampiezza impostabile in un intervallo che va da 100 ns a 0,5 s.

La generazione di un segnale di impulso può essere controllata tramite software o tramite una linea di trigger, il quale inizia con un fronte di salita. L'ampiezza dell'impulso specifica la durata del tempo alto del segnale. In caso di inversione del segnale, l'ampiezza dell'impulso specifica la durata del tempo basso dello

stesso, mentre il resto del segnale di uscita è impostato sul livello alto.

- 3) Misurazione dell'Ampiezza dell'Impulso: Questa funzionalità, anch'essa sostenuta dall'unità DIO di Classe 1, consente di quantificare l'ampiezza di segnali di impulso attraverso un canale di ingresso digitale. Risulta possibile configurare 48 canali bidirezionali come ingressi per questa misurazione, con una capacità di rilevamento dell'ampiezza dell'impulso variabile tra 50 ns e 1,34 s e una risoluzione di 10 ns. Si evidenzia che per una misurazione accurata, sia la fase alta che quella bassa del segnale devono essere superiori a 50 ns; in caso contrario, i dati ottenuti potrebbero non essere precisi.

Queste funzionalità del dSPACE rivestono un ruolo cruciale nel controllo preciso di motori elettrici e nella gestione efficiente dei segnali di comunicazione e controllo.

La funzionalità di gestione dei dati non volatili all'interno del dSPACE consentono l'accesso alla memoria non volatile della scheda in tempo reale grazie a un software dedicato. I valori da scrivere o leggere presenti all'interno della memoria devono essere forniti in un insieme di dati, ciascuno contenente fino a 64 elementi dello stesso tipo di dato. La dimensione massima della memoria disponibile per i dati non volatili è di 64 kB.

MicroLabBox offre un'interfaccia seriale utilizzabile per implementare la comunicazione seriale, è dotata di due interfacce seriali (UART) per comunicare con dispositivi RS232, RS422 e RS485. Le velocità di

trasferimento dati dipendono dal protocollo bus utilizzato: RS232 va da 50 Bd a 230.4 kBd, mentre RS422/485 va da 50 Bd a 10 MBd.

Inoltre, sono presenti interfacce periferiche seriali (SPI) che consentono comunicazioni sincrone ad alta velocità con dispositivi connessi al MicroLabBox, come ad esempio un convertitore A/D. L'unità DIO Classe 1 fornisce fino a quattro interfacce periferiche seriali (SPI). Queste interfacce permettono il trasferimento di flussi di bit seriali con lunghezza e velocità di trasferimento selezionabili da e verso dispositivi esterni. La velocità di trasferimento di base per la trasmissione seriale dei dati è definita dal segnale di clock (CLK), il quale governa il trasferimento dei dati tra l'SPI e il dispositivo esterno collegato.

Per il controllo del motore elettrico, è possibile elaborare segnali in ingresso dai sensori per poi generarne altri aggiungendo oltretutto anche un controller. Il componente principale del controller è l'unità di calcolo dell'angolo.

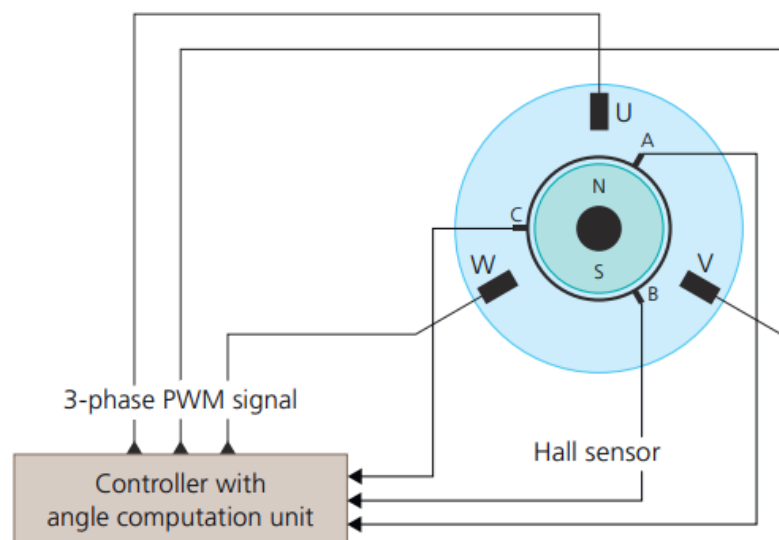


Figura 25 Motore elettrico con una coppia di poli, il cui posizionamento rotazionale è misurato tramite sensori Hall.

Il dSPACE supporta il controllo di motori elettrici con un massimo di 6 fasi e 16 coppie di poli e permette di istanziare fino a 2 controller. Ogni controller può essere collegato con un massimo di due unità sensore. Il controller gestisce le due interfacce sensore A e B in modo diverso.

I tipi di sensori supportati sull'interfaccia del sensore A sono:

- Sensore Hall

Un sensore Hall può rilevare la posizione di un motore immediatamente dopo l'accensione. Tuttavia, la precisione di un sensore Hall è molto bassa.

- Revolver sensor

Un sensore risolutore può rilevare subito dopo la posizione di un motore accendere con alta precisione.

I tipi di sensore supportati sull'interfaccia del sensore B sono:

- Encoder incrementale

Un encoder incrementale ha una precisione maggiore rispetto a un sensore Hall ma richiede fino a un giro del motore per misurare la sua posizione assoluta.

- Encoder assoluto collegato all'interfaccia EnDat o SSI

Un encoder assoluto è in grado di misurare immediatamente la posizione assoluta di un motore.

L'interfaccia seriale sincrona (SSI) fornisce l'accesso agli encoder assoluti che determinano la posizione meccanica del motore.

Gli encoder utilizzano un protocollo di trasmissione seriale e sono collegati a un'interfaccia SSI dove è possibile gestire i due segnali dell'encoder Clock e Data.

### **4.3 Progettazione dei componenti della scheda**

Il focus principale di questa ricerca è la progettazione e l'implementazione di una scheda di interfaccia dedicata alla comunicazione e al controllo reciproco tra i segnali provenienti dal dispositivo dSPACE e quelli dall'inverter, al fine di gestire efficacemente il motore.

Poiché i segnali generati dal dSPACE e dall'inverter sono di natura differente, la scheda sarà responsabile della conversione e dell'adattamento di tali segnali, consentendo una comunicazione fluida tra i due sistemi.

La scheda dovrà configurare varie tipologie di segnali, alcuni dei quali provenienti dal dSPACE e destinati all'inverter oppure dall'inverter in comunicazione con il dSPACE.

Questa necessità di configurazione implica una comprensione approfondita delle specifiche dei segnali e delle modalità di trasmissione sia da parte del dSPACE che dell'inverter, al fine di garantire una corretta interpretazione e manipolazione dei dati.

I segnali collegati nel rapporto dSPACE - Inverter sono tutti di natura digitale e comprendono 12 segnali PWM e 1 segnale di reset. Dall'inverter, invece, devono arrivare al DSP 2 segnali di fault dei moduli, di natura



digitale, e 6 segnali di corrente di fase, 2 segnali di corrente di bus, 1 segnale di tensione di bus e 2 segnali di temperatura dei moduli, tutti di natura analogica.

Come prima cosa iniziamo a interfacciare gli 11 segnali analogici che dall'inverter dovranno essere collegati al dSPACE.

In uscita dall'inverter avremmo 2 connettori.

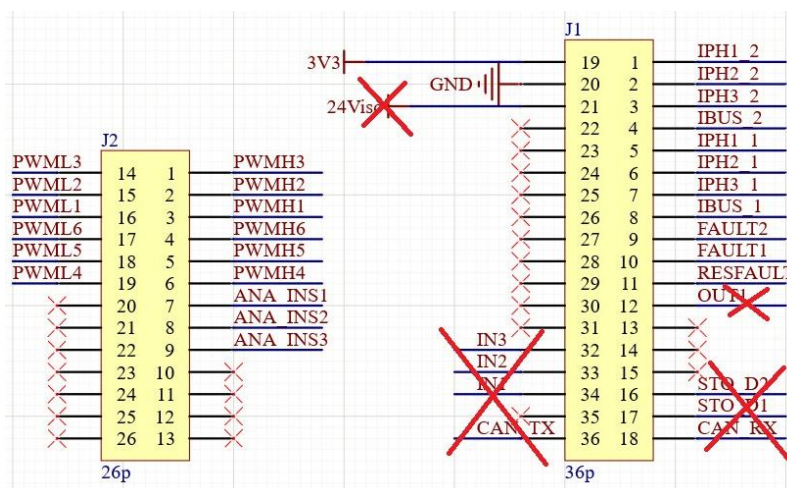


Figura 26 Pin out dell'inverter.

I segnali cancellati in rosso non necessitano di essere interfacciati al dSPACE perché utilizzati per una diversa applicazione dell'inverter e non necessaria alla presente applicazione.

I segnali analogici che vanno collegati al dSPACE sono le 6 correnti di fase denominate “IPH1\_1, IPH2\_1, IPH3\_1 e IPH1\_2, IPH2\_2, IPH3\_2” le 2 correnti di bus “IBUS\_1 e IBUS\_2”, 1 tensione di Bus “ANA\_INS1” e 2 segnali per il controllo della temperatura dei moduli “ANA\_INS2” e “ANA\_INS3”.

Questi segnali devono essere connessi alle porte di ingresso del sistema dSPACE, che consente il collegamento dei segnali analogici tramite connettori BNC.

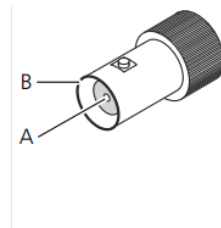


Figura 27 Connettore BNC.

Il sistema dSPACE dispone di 24 ingressi analogici di classe 1 e 8 ingressi analogici di classe 2, entrambi utilizzando connettori BNC, oltre a 16 uscite analogiche di classe 1 anch'esse con connettori BNC.

Gli ingressi di classe 1, come descritto nel precedente capitolo, hanno una risoluzione di 16 bit, un tasso di campionamento di 1 MSPS e sono di tipo differenziale, con una differenza di tensione tra l'ingresso inerente e non inerente di  $\pm 10V$ .

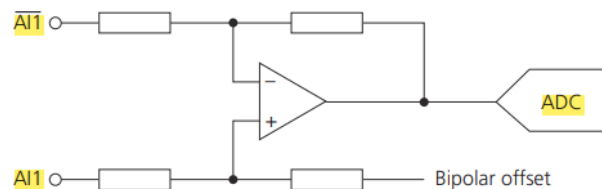


Figura 28 Circuito ingresso analogico categoria 1.

Gli ingressi di classe 2 sono caratterizzati da una risoluzione di 14 bit, con un tasso di campionamento di 10 MSPS e sono sempre di tipo

differenziale, con una differenza di tensione tra l'ingresso inerente e non inerente di +/- 10V.

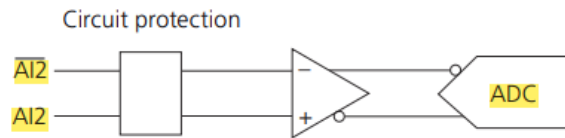


Figura 29 Circuito ingresso analogico categoria 2.

Tutti gli ingressi analogici del dSPACE sono di tipo differenziali quindi senza il riferimento a GND. Le uscite analogiche dell'inverter invece sono di tipo single-ended, quindi, sarà necessario inserire all'interno della scheda che interfaccia i due dispositivi un circuito che faccia questa conversione di segnale.

Un chip scelto per la conversione è il LT6350 della Linear Technology.



Figura 30 LT6350.

Il LT6350 è un convertitore/driver ADC a basso rumore, a ingresso e uscita rail-to-rail, da single-ended a differenziale, caratterizzato da un rapido tempo di stabilizzazione.

Permette la conversione di un segnale di ingresso single-ended ad alta o bassa impedenza in un'uscita differenziale bilanciata a bassa impedenza, adatta per pilotare ADC ad alta prestazione. La topologia a due

amplificatori operazionali presenta amplificatori operazionali a basso rumore, che possono supportare un SNR > 110dB in una larghezza di banda di 1MHz.

Con un'unica alimentazione da 5V, le uscite possono oscillare da 55mV a 4.945V e, con l'aggiunta di un'alimentazione negativa, il LT6350 può oscillare da 0V a 4.945V. La tensione comune di uscita è impostata applicando una tensione al pin +IN2.

Il LT6350 assorbe 4.8mA da un'alimentazione a 5V e consuma solo 60µA in modalità di spegnimento.

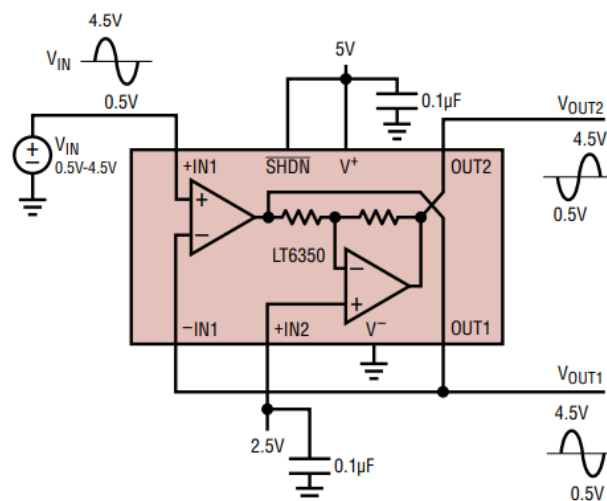


Figura 31 LT6350 configurazione.

Per convertire un segnale di ingresso single-ended ad alta impedenza in un'uscita differenziale a bassa impedenza, l'amplificatore operazionale di ingresso è cablato come un buffer non-invertente con un'alta impedenza di ingresso a +IN1. Alle uscite, VOUT1 segue l'ingresso, mentre VOUT2 fornisce una copia invertita di VOUT1 per un guadagno differenziale complessivo di due. L'amplificatore operazionale di ingresso ha uno stadio di ingresso rail-to-rail, e entrambe le uscite sono rail-to-rail, oscillando

tipicamente entro 55mV consentendo di ottenere uscite differenziali da 8VP-P da un singolo di 5V.

Integrando sulla scheda 11 chip LT6350 per la conversione da single-ended a differenziale e i connettori BNC per il collegamento, è possibile interfacciare i segnali analogici provenienti dall'inverter con il dSPACE. Di seguito sono evidenziati sia i chip che gli ingressi e le uscite analogiche della scheda.

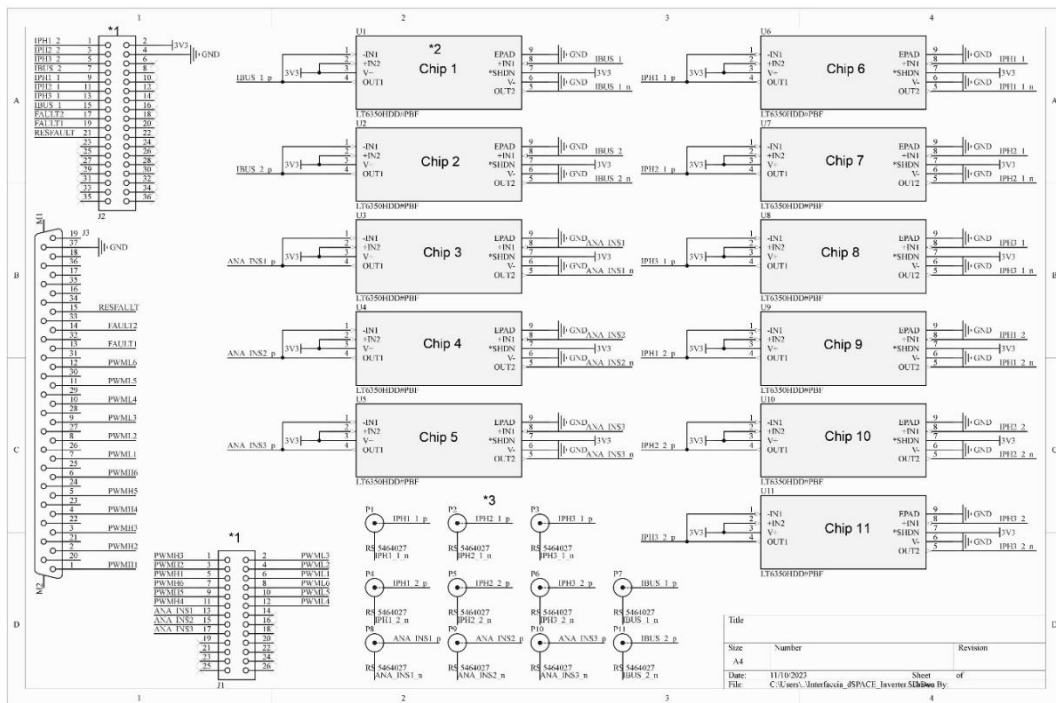


Figura 32 Schematico della scheda  
 \*1 segnali che provengono dall'inverter  
 \*2 Chip di conversione  
 \*3 segnali collegati al dSPACE

Il successivo passaggio consiste nell'interfacciare i 12 segnali del PWM, i quali dal dSPACE dovranno essere collegati all'inverter per il controllo del motore elettrico.

In uscita dal dSPACE, i segnali PWM vengono prelevati dal connettore evidenziato sotto.

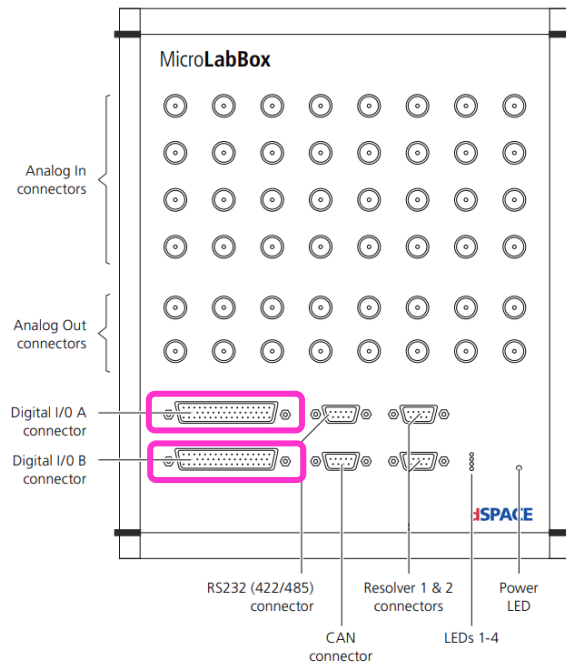


Figura 33 Uscita digitale del DPSACE.

Come precedentemente descritto, i segnali PWM in uscita dal dSPACE si basano sull'unità DIO di classe 1, che fornisce l'accesso ai canali di uscita digitali single-ended.

Relativamente al progetto qui presentato, sarà necessario collegare il cavo RS232 sia al Sub-D di tipo A che al Sub-D di tipo B.

Con il connettore Sub-D A femmina da 50 pin, si ha accesso a 32 canali digitali di classe 1, mentre con il connettore Sub-D B femmina, sempre da 50 pin, si ha accesso a 16 canali digitali di classe 1 e 12 canali digitali di classe 2.

La numerazione dei pin utilizzata per i connettori Sub-D non è standardizzata e prima di collegare il connettore Sub-D è necessario

verificare che la numerazione utilizzata per il collegamento corrisponda alla numerazione indicata come di seguito.

Digital I/O A	Pin	Signal	Pin	Signal	Pin	Signal
	1	GND	18	GND	34	DIO1 ch32
	2	DIO1 ch16	19	GND	35	DIO1 ch31
	3	DIO1 ch15	20	GND	36	DIO1 ch30
	4	DIO1 ch14	21	GND	37	DIO1 ch29
	5	DIO1 ch13	22	GND	38	DIO1 ch28
	6	DIO1 ch12	23	GND	39	DIO1 ch27
	7	DIO1 ch11	24	GND	40	DIO1 ch26
	8	DIO1 ch10	25	GND	41	DIO1 ch25
	9	DIO1 ch9	26	GND	42	DIO1 ch24
	10	DIO1 ch8	27	GND	43	DIO1 ch23
	11	DIO1 ch7	28	GND	44	DIO1 ch22
	12	DIO1 ch6	29	GND	45	DIO1 ch21
	13	DIO1 ch5	30	GND	46	DIO1 ch20
	14	DIO1 ch4	31	GND	47	DIO1 ch19
	15	DIO1 ch3	32	GND	48	DIO1 ch18
	16	DIO1 ch2	33	GND	49	DIO1 ch17
		17	DIO1 ch1		50	GND

Channel	Pin Name	Description
Class 1	DIO1 ch<x> <sup>1)</sup>	DIO1: Digital Class 1 input or output ch<x>: Channel number
	GND	GND: Signal ground

<sup>1)</sup> <x> is in the range of 1 ... 32.

Figura 34 Connettore Sub-D A.

Digital I/O B	Pin	Signal	Pin	Signal	Pin	Signal
	1	GND	18	GND	34	GND
	2	DIO1 ch48	19	DIO2 ch12	35	DIO2 ch12
	3	DIO1 ch47	20	DIO2 ch11	36	DIO2 ch11
	4	DIO1 ch46	21	DIO2 ch10	37	DIO2 ch10
	5	DIO1 ch45	22	GND	38	GND
	6	DIO1 ch44	23	DIO2 ch9	39	DIO2 ch9
	7	DIO1 ch43	24	DIO2 ch8	40	DIO2 ch8
	8	DIO1 ch42	25	DIO2 ch7	41	DIO2 ch7
	9	DIO1 ch41	26	GND	42	GND
	10	DIO1 ch40	27	DIO2 ch6	43	DIO2 ch6
	11	DIO1 ch39	28	DIO2 ch5	44	DIO2 ch5
	12	DIO1 ch38	29	DIO2 ch4	45	DIO2 ch4
	13	DIO1 ch37	30	GND	46	GND
	14	DIO1 ch36	31	DIO2 ch3	47	DIO2 ch3
	15	DIO1 ch35	32	DIO2 ch2	48	DIO2 ch2
	16	DIO1 ch34	33	DIO2 ch1	49	DIO2 ch1
	17	DIO1 ch33		50	GND	

Channel	Pin Name	Description
Class 1	DIO1 ch<x> <sup>1)</sup>	DIO1: Digital Class 1 input or output ch<x>: Channel number
	GND	GND: Signal ground
Class 2	DIO2 ch<x> <sup>2)</sup>	DIO2: Digital Class 2 input or output, non-inverted signal ch<x>: Channel number
	$\overline{\text{DIO2}} \text{ ch<x>}^{\text{2)}$	$\overline{\text{DIO2}}$ : Digital Class 2 input or output, inverted signal ch<x>: Channel number

<sup>1)</sup> <x> is in the range of 33 ... 48.

<sup>2)</sup> <x> is in the range of 1 ... 12.

Figura 35 Connettore Sub-D B.

Con le seguenti uscite digitali è possibile comandare fino a 48 canali bidirezionali per l'emissione di segnali PWM e la tensione di uscita può essere regolata su tre livelli: 2,5 V, 3,3 V, 5,0 V.

Nella fattispecie presente, verrà utilizzata una tensione di 3,3 V per i segnali digitali PWM.

Di seguito vengono riportate in tabella i valori delle uscite riassunte sia per tensione che per corrente, e uno schema elettrico semplificato dei canali digitali bidirezionali di classe 1.

Parameter <sup>1)</sup>	Signal Level <sup>2)</sup>	Min.	Typ.	Max.	Unit
<b>DC characteristics</b>					
Output high voltage without load	2.5 V	2.0	2.5		V
	3.3 V	2.4	3.3		V
	5 V	4.5	5.0		V
Output current	2.5 V	-15		+15	mA
	3.3 V	-45		+45	mA
	5 V	-45		+45	mA

Figura 36 Caratteristiche dell'uscita digitale del DSPACE.

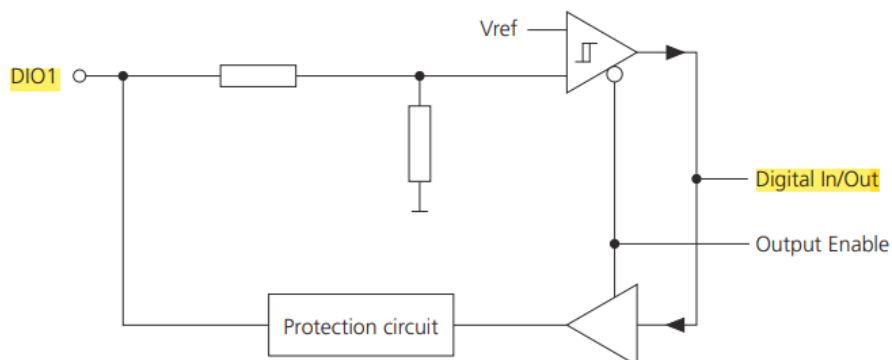


Figura 37 Schema elettrico semplificato dei canali digitali bidirezionali di Classe 1.



Sulla scheda sono stati inseriti dei connettori che permettono di collegare i bus RS232 ai connettori Sub-D A e B, per poterli successivamente collegare all'inverter.

I 12 segnali che arrivano al dSPACE e finiscono all'inverter per il controllo del PWM del motore elettrico sono il gruppo di segnali denominato PWML1 fino a PWML6 e PWMH1 fino a PWMH6, situati all'ingresso dell'inverter come raffigurato di seguito.

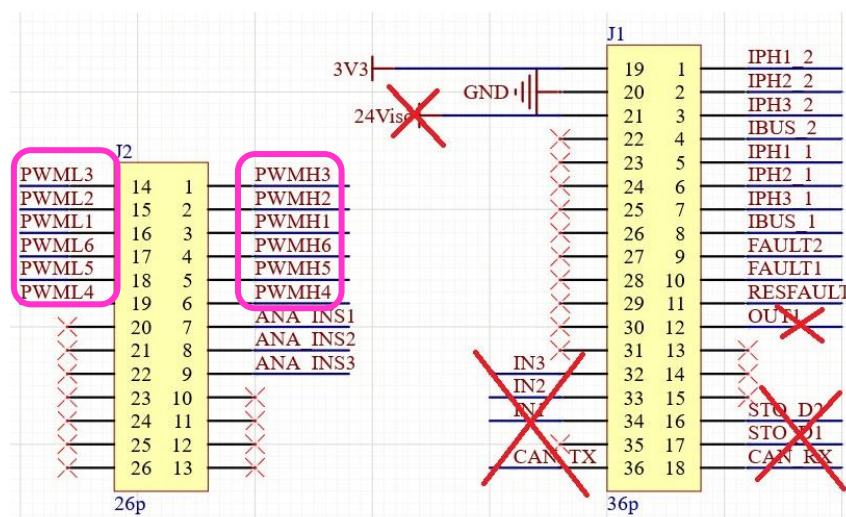


Figura 38 Segnali digitali dell'inverter.

Successivamente viene inserito nella scheda un connettore con funzione di ingresso che permette di ricevere i segnali provenienti dal bus RS232 collegato ai connettori del DSP dei Sub-D A e B, denominato nella figura sottostante con \*4.

Questi connettori saranno successivamente collegati ai connettori situati sulla scheda che andranno collegati all'inverter, denominati nella figura sottostante con \*1.

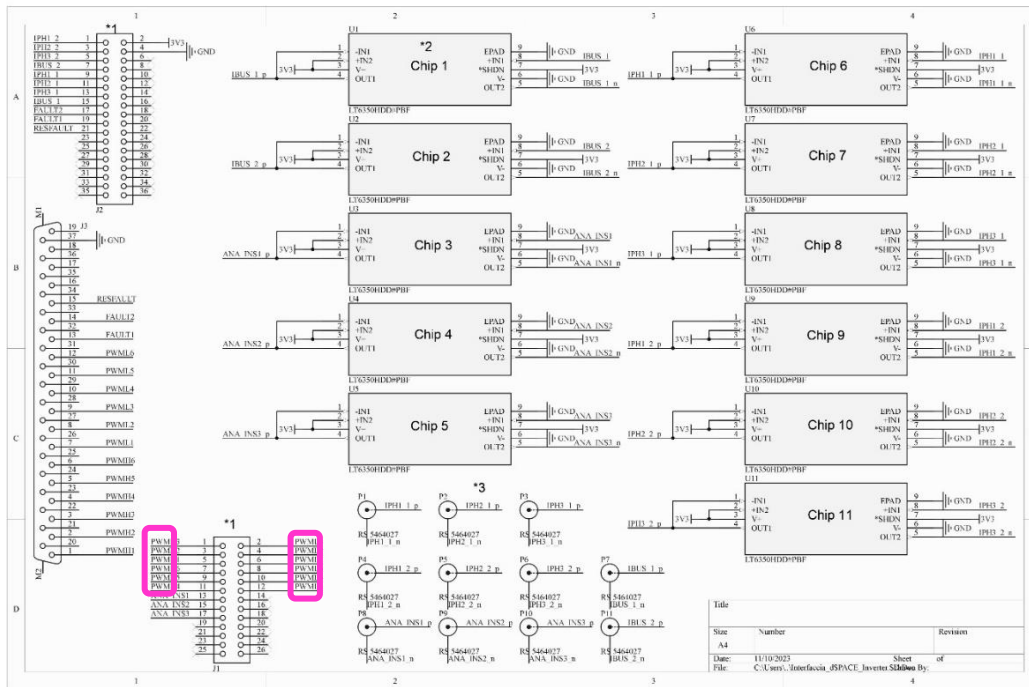


Figura 39 Rappresentazione circuito della scheda.

I connettori Sub-D A e B avranno una configurazione sia di ingresso che di uscita.

Infatti, andranno collegati anche i 2 segnali analogici che dall'inverter andranno al dSPACE.

In particolare, stiamo parlando dei segnali di Fault dei moduli che nella scheda dell'inverter sono raffigurati come Fault 1 e Fault 2 (questi segnali servono per la generazione dell'interrupt).

Gli interrupt hardware della funzionalità Bit I/O vengono utilizzati per attivare attività guidate da interrupt che vengono eseguite su MicroLabBox. Le linee di trigger vengono utilizzate per trasmettere un segnale di trigger a un consumatore interno o esterno del trigger. È possibile configurare il sistema per generare interrupt, segnali di trigger o entrambi.

MicroLabBox fornisce interruzioni per controllare l'esecuzione delle routine del servizio di interruzione su diversi livelli del codice del programma. Il controller degli interrupt della scheda DS1202 di MicroLabBox gestisce vari interrupt (attivati dal livello o dal fronte), come ad esempio gli interrupt del timer. Ogni core del processore ha il proprio controller di interruzione. Le interruzioni possono essere mascherate ed è possibile abilitare e disabilitare globalmente la generazione di interrupt. Le interruzioni hanno la priorità.

L'ultimo segnale rimanente è quello dell'encoder. Utilizziamo l'encoder per sapere con precisione la posizione in tempo reale del motore in ogni istante. Si potrebbe collegare direttamente alla logica di controllo, ma dato che il dSPACE e il Mechstore utilizzano due protocolli di comunicazione differenti, sarà necessario inserire un trasduttore all'interno della scheda per far comunicare i due dispositivi.

Il dSPACE utilizza una comunicazione SSI (Synchronous Serial Interface), ovvero un protocollo di comunicazione seriale sincrono con il clock. Il dispositivo master genera il segnale di clock e il dispositivo slave (ad esempio, un encoder) risponde con i dati corrispondenti.

Il Mechstore, invece, utilizza una comunicazione RS485, un protocollo differenziale in cui i dati sono trasmessi utilizzando due fili (A e B) che trasportano segnali opposti.

## 5 Conclusione

Il progetto presentato in questa tesi ha dimostrato l'importanza e la fattibilità di sviluppare una scheda di interfaccia per l'integrazione tra un dispositivo dSPACE e un inverter per il controllo di un motore elettrico collegato a un volano. Utilizzando dSPACE come scheda per la simulazione, questo sistema ha il potenziale di migliorare significativamente l'efficienza energetica, consentendo di immagazzinare l'energia in eccesso prodotta da fonti rinnovabili e di utilizzarla nei momenti di maggiore necessità.

Nel corso della tesi è stata descritta dettagliatamente la progettazione e la realizzazione della scheda di interfaccia. Questa scheda svolge un ruolo cruciale nel facilitare la comunicazione e il controllo reciproco tra i segnali digitali di dSPACE e quelli analogici dell'inverter. Grazie a una serie di componenti elettronici avanzati, come i convertitori analogico/digitali e i driver PWM, la scheda permette di adattare e trasformare i segnali, garantendo una gestione ottimale del sistema.

Integrando dSPACE con un inverter tramite la scheda di interfaccia progettata, è possibile ottimizzare il controllo del motore, che può operare sia come motore sia come generatore di elettricità. Questo consente di migliorare le prestazioni complessive del sistema, riducendo le perdite di energia e massimizzando l'utilizzo delle fonti rinnovabili.

Nel contesto attuale, caratterizzato da una crescente dipendenza dalle energie rinnovabili e dalla necessità di ridurre le emissioni di gas serra, lo sviluppo di soluzioni innovative per l'accumulo e la gestione dell'energia è cruciale. Il sistema proposto si distingue per l'adozione di tecnologie avanzate come il volano per l'accumulo di energia cinetica, che offre

vantaggi significativi rispetto alle tradizionali batterie al litio in termini di efficienza, sostenibilità ambientale e costi di manutenzione.

L'analisi condotta ha evidenziato come le soluzioni attuali per lo stoccaggio dell'energia siano spesso insufficienti per soddisfare la domanda energetica, sottolineando la necessità di sviluppare sistemi più avanzati e integrati. Il progetto della scheda di interfaccia rappresenta un passo avanti in questa direzione, fornendo una piattaforma versatile ed efficiente per la gestione dell'energia prodotta da fonti rinnovabili.

In conclusione, il lavoro svolto dimostra che l'integrazione di tecnologie innovative nel campo dell'accumulo e gestione dell'energia può contribuire in modo significativo alla transizione verso un sistema energetico più sostenibile. Questo progetto, oltre a fornire un contributo concreto alla ricerca nel settore delle energie rinnovabili, apre nuove prospettive per ulteriori sviluppi e ottimizzazioni, ponendo le basi per soluzioni sempre più efficienti e sostenibili.

## Lista delle Figure.

Figura 1: Pacchetto pronti per il 55% entro il 2030.....	6
Figura 2: Media consumo energetico dal 20250 ad oggi.....	7
Figura 3: Emissioni evitate nel mondo grazie alle rinnovabili.....	8
Figura 4: Spesa media annua in una famiglia.....	10
Figura 5: Curva carico giornaliera di Frigocongelatori.....	12
Figura 6: Curva carico giornaliera per Illuminazione.....	13
Figura 7: Curva carico giornaliera per Lavabiancherie.....	14
Figura 8: Curva carico giornaliera per scalda acqua.....	14
Figura 9: Curva carico giornaliera per Audiovisivi.....	15
Figura 10: Curva carico giornaliera per computer e affini.....	16
Figura 11: Sistema impianto fotovoltaico.....	17
Figura 12: Pannello solare in un'abitazione.....	18
Figura 13: Batterie al litio per pannello fotovoltaico.....	21
Figura 18 Modello di accumulo di energia a volano.....	22
Figura 19 Formula energia cinetica immagazzinata.....	24
Figura 16 Formula momento di inerzia.....	24
Figura 20 Descrizione del sistema.....	25
Figura 18 Formula capacità del volano.....	26
Figura 19 Il dSPACE.....	29
Figura 20 MicroLabBox con BNC.....	29
Figura 21 Configurazione di un canale del ADC classe 1.....	32
Figura 22 PWM sincrono.....	34

Figura 23 PWM asincrono.....	35
Figura 24 PWM asincrono con aggiornamento a livello alto.....	36
Figura 25 Motore elettrico con una coppia di poli, con sensori Hall.....	38
Figura 26 Pin out dell'inverter.....	41
Figura 27 BNC.....	42
Figura 28 Circuito ingresso analogico categoria 1.....	42
Figura 29 Circuito ingresso analogico categoria 2.....	43
Figura 30 LT6350.....	43
Figura 31 LT6350 configurazione.....	44
Figura 32 Schematico della scheda.....	45
Figura 33 Uscita digitale del DPSACE.....	46
Figura 34 Connettore Sub-D A.....	47
Figura 35 Connettore Sub-D A.....	47
Figura 36 Caratteristiche dell'uscite digitale del DSPACE.....	48
Figura 37 Schema elettrico semplificato dei canali digitali bidirezionali di Classe 1.....	48
Figura 38 Segnali digitali del 'inverter.....	49
Figura 39 Rappresentazione circuito della scheda.....	50

## Bibliografia

- [1] <https://www.istat.it/it/files/2022/12/Consumi-energetici-famiglie-2020-2021-.pdf>
  
- [2] [https://www.mase.gov.it/sites/default/files/PNIEC\\_2023.pdf](https://www.mase.gov.it/sites/default/files/PNIEC_2023.pdf)
  
- [3] [https://www.eerg.it/resource/pages/it/Progetti\\_-\\_MICENE/compendio\\_misure\\_consumi\\_elettrici.pdf](https://www.eerg.it/resource/pages/it/Progetti_-_MICENE/compendio_misure_consumi_elettrici.pdf)
  
- [4] <https://www.consilium.europa.eu/it/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-greentransition/#:~:text=Il%20pacchetto%20sul%20mercato%20dell,entro%20il%202030%20e%20oltre.>
  
- [5] [MicroLabBoxHardwareInstallationConfiguration.pdf](#)
  
- [6] [RTIElectricMotorControlBlocksetReference.pdf](#)
  
- [7] [LT6350\\_SingleEnded\\_Differential\\_Converter.pdf](#)
  
- [8] [RS5464027\\_BNC\\_Connector.pdf](#)
  
- [9] [MicroLabBoxFeatures.pdf](#)



## *Ringraziamenti*

*Desidero esprimere la mia più profonda gratitudine al Professor Alberto Bellini e a Elena Marcelli per il supporto e la guida forniti durante la realizzazione di questa tesi.*

*Ringrazio di cuore la mia famiglia, la cui costante presenza e supporto sono stati fondamentali durante tutto il mio percorso di studi. Un ringraziamento speciale va ai miei genitori, che mi hanno sempre incoraggiato in ogni momento, credendo in me anche quando io stesso faticavo a farlo, e un grazie particolare va a mio fratello per l'aiuto costante fornito. La sua presenza continua e il suo sostegno pratico ed emotivo hanno reso possibile il raggiungimento di questo importante traguardo. Grazie per essere stato sempre al mio fianco, dimostrandomi che insieme possiamo superare qualsiasi difficoltà.*

*A tutti voi, la mia riconoscenza è infinita.*