



Università degli Studi di Padova  
Facoltà di Ingegneria  
Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccatronica

tesi di laurea

# Interferenze elettromagnetiche e linee CANbus: analisi e soluzioni

**Relatore:** Prof. Alessandro Sona

**Laureandi:** Alex Giaroli  
Alessandro Spiller  
Rudi Gomirato  
Samuele Barban

A.A. 2023-24

---

Autori:

Alex Giaroli

Alessandro Spiller

Rudi Gomirato

Samuele Barban

# Indice

## Introduzione

<b>1</b>	<b>Principi EMC</b>	<b>3</b>
1.1	Nozioni base EMC ed EMI . . . . .	3
1.2	Modellizzazione EMC . . . . .	3
1.3	Classificazione dei fenomeni EMI . . . . .	4
1.4	Grandezze fisiche in ambito EMC . . . . .	5
1.4.1	Corrente elettrica . . . . .	5
1.4.2	Tensione elettrica . . . . .	6
1.4.3	Campo elettrico . . . . .	6
1.4.4	Campo magnetico . . . . .	8
1.4.5	Campo elettromagnetico . . . . .	10
1.4.6	Elementi parassiti in un tratto conduttore . . . . .	11
1.4.7	Accoppiamento EM . . . . .	15
<b>2</b>	<b>Teoria del sistema esaminato</b>	<b>19</b>
2.1	Teoria del CANbus . . . . .	19
2.1.1	Storia ed evoluzione . . . . .	19
2.1.2	Principi fondamentali . . . . .	20
2.1.3	Piano fisico . . . . .	20
2.1.4	Struttura dei messaggi e formattazione . . . . .	22
2.2	Malfunzionamenti della linea CAN . . . . .	23
2.2.1	Gestione errori . . . . .	24
2.2.2	Vantaggi e svantaggi . . . . .	25
2.2.3	Applicazioni e casistiche . . . . .	25
2.3	Problematiche legate all'utilizzo dell'inverter . . . . .	26
2.3.1	Correnti digitali . . . . .	26
2.3.2	Correnti di modo comune e differenziale . . . . .	27
2.3.3	Correnti di ritorno . . . . .	29
2.4	Soluzioni Software . . . . .	29

<b>3</b>	<b>Sistema fisico</b>	<b>31</b>
3.1	Pompa elettrica . . . . .	31
3.2	Inverter . . . . .	33
3.3	Modulo CANbus . . . . .	33
3.4	Cavo . . . . .	34
3.5	Sensori . . . . .	35
3.5.1	PTC . . . . .	36
3.5.2	PT100 . . . . .	37
3.5.3	Inclinometro . . . . .	37
3.5.4	Pressostato . . . . .	38
3.6	Soluzioni pratiche . . . . .	39
3.6.1	Contenimento dei disturbi con il cablaggio . . . . .	39
3.6.2	Accorgimenti ulteriori di prevenzione EMI . . . . .	42
<b>4</b>	<b>Analisi e risultati</b>	<b>45</b>
4.1	Tipologia di misure . . . . .	45
4.2	Setup di misura . . . . .	46
4.2.1	NI myDAQ . . . . .	46
4.3	Istruzioni di misura . . . . .	48
4.3.1	Corretta terminazione del CANbus . . . . .	48
4.3.2	Cortocircuito tra CAN-GND e CAN-L . . . . .	49
4.3.3	Livelli di tensione corretti su CAN-H e CAN-L . . . . .	50
4.3.4	Corretta messa a terra del CANbus . . . . .	51
4.4	Risultati ottenuti . . . . .	52
4.4.1	Misure di resistenza . . . . .	53
4.4.2	Misure di tensione . . . . .	54
	<b>Conclusioni</b>	<b>56</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>58</b>
	<b>Elenco delle tabelle</b>	<b>61</b>
	<b>Elenco delle figure</b>	<b>62</b>

# Introduzione

Le problematiche EMC sono di grande attualità nell'ambito industriale e delle telecomunicazioni vista l'elevata diffusione di dispositivi elettrici e elettronici molto sensibili alle interferenze elettromagnetiche. Le cause di tali vulnerabilità risiedono nelle dimensioni ridotte dei dispositivi, nelle elevate frequenze in gioco e nelle basse tensioni di alimentazione.

La realizzazione di un dispositivo conforme ai requisiti EMC è un'operazione molto difficile, esso dovrà infatti rispettare diverse normative imposte dai paesi in cui verrà commercializzato. Tali normative hanno l'obiettivo di attestare l'idoneità di funzionamento del dispositivo in un ambiente elettromagnetico.

L'apparecchio in questione, infatti, non deve risentire dei disturbi generati dagli altri dispositivi presenti nello stesso ambiente (immunità) e non deve a sua volta compromettere il funzionamento degli altri apparecchi (emissione).

L'obiettivo di questo elaborato è di studiare e verificare il corretto funzionamento del protocollo di comunicazione CANbus, in un sistema fisico realizzato dall'azienda Dragflow, dal punto di vista EMC. A tal fine verranno eseguite delle semplici misure elettriche che dimostrano l'efficacia di eventuali soluzioni tecniche adottate per mitigare i disturbi. La scelta di basare questa tesi su un sistema fisico è motivata dalla volontà di affrontare problemi tangibili e fornire soluzioni che possano avere un impatto diretto sul campo applicativo in questione. Tale approccio permette non solo di comprendere in profondità le sfide tecniche e i problemi associati, ma anche di valutare le soluzioni proposte in un contesto pratico e reale. Il sistema presente in azienda comprende i seguenti elementi:

- motore-inverter;
- linea CANbus;
- sensori;

- PLC.

Più in dettaglio, il motore alimentato dall'inverter, muove una pompa elettrica sommergibile impiegata per il dragaggio dei fondali. Sulla pompa sono installati dei sensori che comunicano, tramite il protocollo CANbus con un PLC a bordo macchina.

L'attenzione, in questo documento, sarà quindi posta sullo studio dei disturbi generati dall'inverter che affliggono la comunicazione della linea CANbus.

I contenuti presentati saranno suddivisi in quattro capitoli principali dei quali di seguito è riportata una breve descrizione:

- il primo capitolo comprenderà le definizioni teoriche delle grandezze elettriche relative all'ambito EMC, degli elementi parassiti che caratterizzano un generico tratto conduttore e verranno infine illustrate le principali modalità di trasferimento delle interferenze elettromagnetiche tra il dispositivo sorgente e quello vittima;
- il secondo capitolo comprenderà una descrizione teorica dettagliata del protocollo CANbus, delle problematiche EMC ad esso correlate e gli accorgimenti software applicabili;
- il terzo capitolo comprenderà una descrizione dettagliata del sistema fisico, progettato dall'azienda Dragflow, e dei suoi componenti. Verranno poi discussi accorgimenti applicati ed applicabili in futuro per attenuare l'effetto dei disturbi sulla linea CANbus;
- Nel quarto capitolo in conclusione, verranno riportati i risultati delle misure di verifica sulla linea CANbus;
- infine verranno discusse le conclusioni.

# Capitolo 1

## Principi EMC

### 1.1 Nozioni base EMC ed EMI

"La compatibilità elettromagnetica (Electromagnetic Compatibility, EMC) è una disciplina che verte nel valutare la generazione, la trasmissione e la ricezione non intenzionale di energia elettromagnetica (EM) in funzione agli effetti indesiderati che da tali fenomeni, detti fenomeni EMI (Electromagnetic Interference), possono derivare".

"I fenomeni EMI, o di interferenza elettromagnetica, sono fenomeni di natura elettrica o elettromagnetica indesiderati e problematici, che avvengono tra dispositivi di tipo elettrico, elettronico e delle telecomunicazioni".

In generale, in ogni sistema in cui vi è presenza di EMI, si possono notare i seguenti elementi:

- **sorgente:** emette il disturbo;
- **mezzo di trasmissione:** propaga il disturbo;
- **dispositivo vittima:** riceve/subisce gli effetti del disturbo.

### 1.2 Modellizzazione EMC

Sia l'elemento sorgente che il ricevitore utilizzano correnti e tensioni, generando, di conseguenza, campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici, risentendo di quest'ultimi quando provenienti dall'esterno. Risulta perciò importante, per uno studio efficace dei disturbi, definire correttamente i

tre elementi sopra indicati. Vista la complessità dei fenomeni EMC è utile schematizzare qualsiasi sistema elettronico o elettrico come una coppia generatore-carico, o Trasmettitore  $Tx$  – ricevitore  $Rx$  come schematizzato in figura [1.1]. In questo modo è possibile semplificare lo studio del problema.

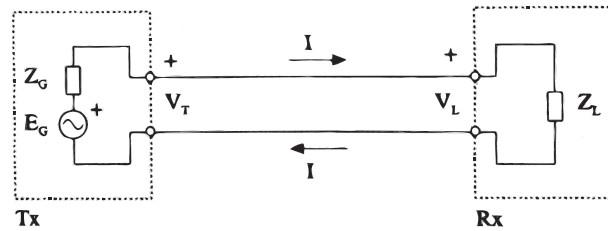


Figura 1.1: Generico circuito sorgente o vittima di interferenza EM [1].

Sempre in figura [1.1] si può osservare che la sorgente è schematizzata come un generatore di tensione variabile ( $E_G$ ) ed un'impedenza ( $Z_G$ ). Il carico, invece, è schematizzato come un'impedenza ( $Z_L$ ). Essi scambiano informazioni mediante livelli di tensione, in particolare  $V_T$  è emessa dal trasmettitore  $Tx$  e  $V_L$  è letta dal ricevitore  $Rx$ . Idealmente vale che  $V_L \cong V_T$ . Nella realtà avviene che il ricevitore  $Rx$  legge la tensione  $V_T$  sovrapposta ad un disturbo  $V_n$ .

$$V_L = V_T + V_n \quad (1.1)$$

Se il disturbo  $V_n$  è tale da non essere trascurabile, in ampiezza ed in frequenza, rispetto alla tensione  $V_T$ , allora la comunicazione non sarà efficace. Si verificheranno malfunzionamenti del sistema, generati da dati errati o mancanti, falsi allarmi e calo delle prestazioni nei sistemi di controllo.

### 1.3 Classificazione dei fenomeni EMI

I fenomeni EMI si raggruppano in differenti tipologie. Al variare da un fenomeno ad un altro cambiano le grandezze coinvolte, i fenomeni fisici, le frequenze, le normative di riferimento, le tecniche e la strumentazione di misura, ecc. Possono essere, tuttavia, raggruppati in 4 macrocategorie di problematiche:



**1. Emissione EM:**

anche detta *compatibilità elettromagnetica*, sono tutti quei fenomeni di emissione condotta o irradiata generati da una specifica sorgente (trasmettitore  $Tx$ );

**2. Suscettibilità EM:**

anche detta *immunità elettromagnetica* comprende tutti i fenomeni di accoppiamento condotto o irradiato che si manifestano ai danni dell'elemento vittima (ricevitore  $Rx$ );

**3. Auto-compatibilità EM:**

anche detta self-EMC comprende tutti quei fenomeni EMI tra due parti del medesimo dispositivo. Questa classe di problematiche comprende fenomeni EMI in cui il dispositivo emette dei disturbi che vanno ad interferire con i propri circuiti, compromettendone il suo stesso funzionamento;

**4. Compatibilità EM ambientale:**

comprende tutti i fenomeni elettromagnetici la cui sorgente dell'interferenza è un dispositivo e la vittima è l'uomo o l'ambiente.

## 1.4 Grandezze fisiche in ambito EMC

Le grandezze fisiche responsabili di fenomeni di interferenza EM sono:

- corrente elettrica;
- tensione elettrica;
- campo elettrico;
- campo magnetico;
- campo elettromagnetico.

### 1.4.1 Corrente elettrica

"Grandezza fisica che esprime la quantità di carica passante ( $\Delta Q$ ) per un conduttore di una certa sezione in un intervallo temporale ( $\Delta t$ )".

Si ricorda che la corrente è generata da un flusso di cariche composte da elettroni e lacune (quasi-particelle che esprimono la mancanza di elettrone). Il moto delle cariche è caotico e generato dalla presenza di un campo

elettrico nel conduttore. La formula che esprime l'intensità della corrente è:

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad [\text{A}] \quad (1.2)$$

### 1.4.2 Tensione elettrica

"Si tratta di una grandezza fisica generata dalla presenza di accumuli di cariche elettriche nello spazio".

La tensione tra due punti  $A$  e  $B$  dipende dal campo elettrico secondo la relazione:

$$V = V_A - V_B = \int_{A,l}^B \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \quad [\text{V}] \quad (1.3)$$

con  $V_A$  e  $V_B$  si individuano i potenziali nei due punti,  $l$  è un qualsiasi percorso che collega i due punti,  $d\mathbf{l}$  è il versore di lunghezza infinitesima tangente ad  $l$  in ogni punto ed  $\mathbf{E}$  è il campo elettrico.

### 1.4.3 Campo elettrico

"Il campo elettrico  $\mathbf{E}$  è un campo di forze vettoriale generato nello spazio dalla presenza di carica elettrica o di un campo magnetico variabile nel tempo".

In ogni punto dello spazio è la somma di due componenti:

1. campo elettrico coulombiano  $E_c$ ;
2. campo elettrico indotto  $E_i$

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_c + \mathbf{E}_i \quad (1.4)$$

### Campo elettrico coulombiano

"Contributo del campo  $\mathbf{E}$  generato dalla presenza di cariche elettriche nello spazio".

La figura [1.2] rappresenta una possibile schematizzazione dell'andamento del campo elettrico Coulombiano.

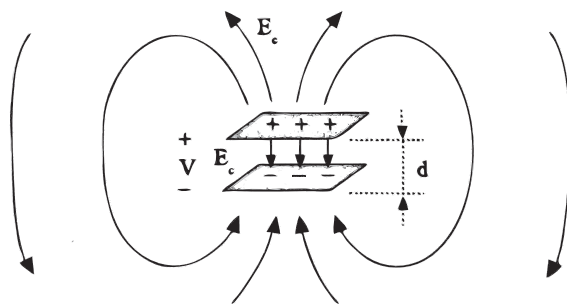


Figura 1.2: Rappresentazione campo elettrico  $E_c$  (coulombiano) [1].

Si può notare come le **linee del campo** elettrico, generate da cariche positive e negative presenti su due piani finiti distanti  $d$ , abbiano l'andamento mostrato in Fig [1.2].

Mentre se la superficie a cui si fa riferimento ha estensione infinita le linee di campo emergerebbero perpendicolarmente dalle superfici e avrebbero direzioni uscente dal piano positivo ed entrante dal piano negativo.

Sempre nel caso di due piani carichi infiniti il valore del campo elettrico coulombiano è:

$$E_c = \frac{V}{d} \quad \left[ \frac{V}{m} \right] \quad (1.5)$$

Quest'ultima formula è molto utile in ambito EMC, poiché ci permette di capire l'andamento del campo elettrico coulombiano al variare della distanza  $d$ , figura [1.2]. Ossia partendo dal caso peggiore ( $d_{min}$ ) si ottiene che il valore massimo della componente coulombiana del campo elettrico è  $E_{c \ max}$  e il modulo di  $\mathbf{E}_c$  decresce secondo un andamento iperbolico:

$$E_{c \ max} = \frac{V}{d_{min}} \quad \left[ \frac{V}{m} \right] \quad (1.6)$$

### Campo elettrico indotto

"Contributo del campo  $\mathbf{E}$  generato dalla presenza di un campo magnetico  $\mathbf{H}$  variabile nel tempo".

La **legge di Faraday** ne esprime il legame:

$$\oint_{l_c} \mathbf{E}_i \cdot \mathbf{t} \, dl = - \frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} \, dS \quad (1.7)$$

In essa si indica con  $l_c$  una qualsiasi linea chiusa nello spazio, con  $t$  il versore di percorrenza di  $l_c$ , con  $S$  una generica superficie avente per contorno la curva  $l_c$  e per orientamento il versore normale, con  $\mathbf{B}$  il *vettore induzione magnetica*. Si specifica che i due versori  $\mathbf{n}$  e  $\mathbf{t}$  devono essere orientati

secondo la regola della vite destrorsa.

Si ricorda la formula che lega il vettore induzione  $\mathbf{B}$  al campo magnetico  $\mathbf{H}$ :

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (1.8)$$

In essa si indica con  $\mathbf{B}$  il vettore induzione, con  $\mathbf{H}$  il campo magnetico e con  $\mu$  la permeabilità magnetica del mezzo.

#### 1.4.4 Campo magnetico

"Il **vettore campo magnetico  $\mathbf{H}$**  è un campo di forze vettoriali generato nello spazio dal movimento di cariche elettriche, e quindi da una corrente  $i$ ". Ne consegue che l'unità di misura del campo magnetico è  $\frac{A}{m}$ .

La **legge di Laplace** esprime il legame tra  $H$  ed  $i$ :

$$d\mathbf{H} = \frac{i}{4\pi} \frac{d\mathbf{l} \times (\mathbf{r} - \mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3} \quad (1.9)$$

La figura [1.3] rappresenta un'applicazione grafica di tale legge. In un circuito filiforme  $l$ , ogni tratto di lunghezza infinitesima  $d\mathbf{l}$ , di posizione vettoriale  $\mathbf{r}'$  ed interessato dal passaggio di una corrente  $i$  fornirà un contributo di campo magnetico  $d\mathbf{H}$  nel punto individuato da  $\mathbf{r}$ .

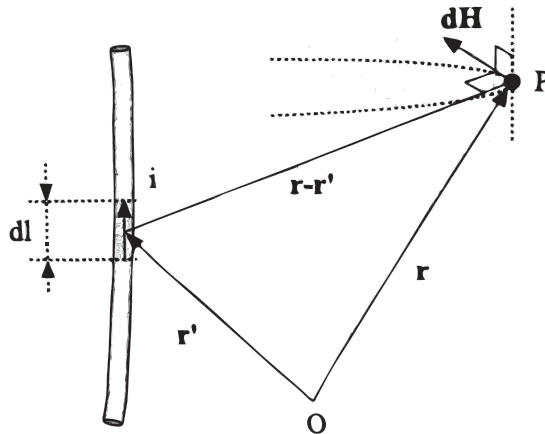


Figura 1.3: Rappresentazione grafica della Legge di Laplace [1].

E' possibile calcolare il campo magnetico prodotto in un punto  $P$  dello spazio, come rappresentato in figura [1.3], con la seguente formula:

$$\mathbf{H}(P) = \frac{i}{4\pi} \int_l \frac{d\mathbf{l} \times (\mathbf{r} - \mathbf{r}')}{r^3} \quad (1.10)$$

$$r = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|$$

Applicando tale formula al caso di un conduttore con lunghezza infinita si ottiene le formula di **Biot-Savart**:

$$\mathbf{H}(r) = \frac{i}{2\pi r} \mathbf{u}_\phi \quad (1.11)$$

Essa esprime il campo magnetico, orientato secondo il versore  $\mathbf{u}_\phi$ , ad una distanza  $r$  dal conduttore percorso da una corrente  $I$ , come illustrato in Fig. [1.4].

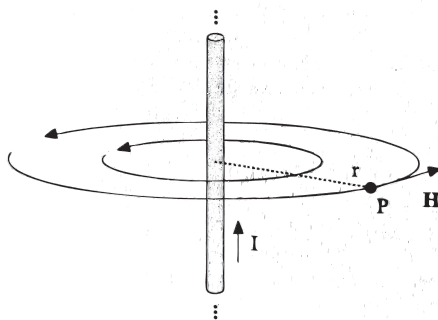


Figura 1.4: Legge di Biot-Savart [1].

### Permeabilità magnetica

E' una proprietà del materiale che esprime la sua attitudine a polarizzarsi in seguito all'applicazione di un campo magnetico.

La permeabilità magnetica è un termine composto:

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad (1.12)$$

Con  $\mu_0$  si indica la *permeabilità magnetica nel vuoto*, essa ha un valore costante pari a  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{m}$ .

Con  $\mu_r$  si indica la *permeabilità magnetica relativa*. Quest'ultima è un termine che varia da materiale a materiale ed in base al suo valore si classificano 3 tipi di materiali:

- materiali ferromagnetici sono fortemente favorevoli alla magnetizzazione ( $\mu_r \gg 1$ );

- materiali paramagnetici sono debolmente favorevoli alla magnetizzazione ( $\mu_r > 1$ );
- materiali diamagnetici sono debolmente resistenti alla magnetizzazione ( $\mu_r < 1$ );

### 1.4.5 Campo elettromagnetico

"Il **campo elettromagnetico**, o campo EM, è una grandezza vettoriale formata dall'insieme di un campo  $E$  e di un campo  $H$  opportunamente concatenati".

Le sue caratteristiche lo rendono adatto alla propagazione come onda elettromagnetica. Tale onda si propaga nello spazio senza alcuna relazione con la sorgente che l'ha generata.

In Fig.[1.5] si mostra come le componenti di  $E$  ed  $H$ , in ogni punto dello spazio, hanno un andamento sinusoidale e sono tra loro ortogonali rispetto alla direzione di propagazione dell'onda.

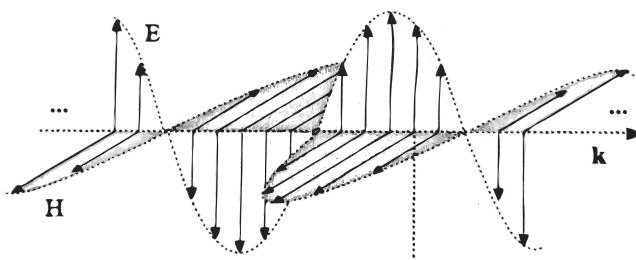


Figura 1.5: Rappresentazione grafica del campo elettromagnetico [1].

Le **equazioni di Maxwell** esprimono in maniera locale, ossia differenziale, il comportamento del campo EM in relazione alle distribuzioni di carica e di corrente.

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1.13)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1.14)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1.15)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (1.16)$$

### Permittività elettrica

La permittività elettrica o costante dielettrica del materiale  $\varepsilon$  è una proprietà legata al materiale dielettrico interagente con campo elettrico  $E$ , in particolare essa rappresenta la facilità di tale materiale a polarizzarsi in presenza di un campo  $E$ :

$$D = \varepsilon \cdot E \quad (1.17)$$

Con  $D$  viene indicato il vettore spostamento elettrico.

La permittività elettrica è un valore composto:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \quad (1.18)$$

La prima componente indica la costante dielettrica nel vuoto, pari a:

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{36 \cdot \pi} \cdot 10^{-9} \frac{F}{m}.$$

La seconda componente indica la costante dielettrica del materiale  $\varepsilon_r$ .

### 1.4.6 Elementi parassiti in un tratto conduttore

I conduttori hanno come scopi principali la trasmissione di potenza, di segnali ecc..., tuttavia intercettano e trasmettono anche disturbi.

I conduttori ideali hanno le seguenti caratteristiche:

- impedenza  $Z_{AB}$  nulla;
- differenza di potenziale  $V_{AB}$  nulla;
- isolato;
- indipendente da qualunque altro materiale nelle vicinanze.

Queste caratteristiche saranno valide per qualunque valore di corrente  $i$  e frequenza  $f$ .

Il modello sopra descritto non è valido nel caso reale. In un tratto di conduttore, all'aumentare della frequenza, sono sempre più presenti dei **fenomeni parassiti** che deviano il passaggio della corrente dal percorso standard del caso ideale. Tali fenomeni, denominati anche *stray phenomena*, sono di seguito elencati e rappresentati nella Fig.[1.6]:

- resistenza parassita  $r$ ;
- induttanza parassita  $l$ ;
- capacità parassita  $c$ ;

- conduttanza parassita  $g$ .

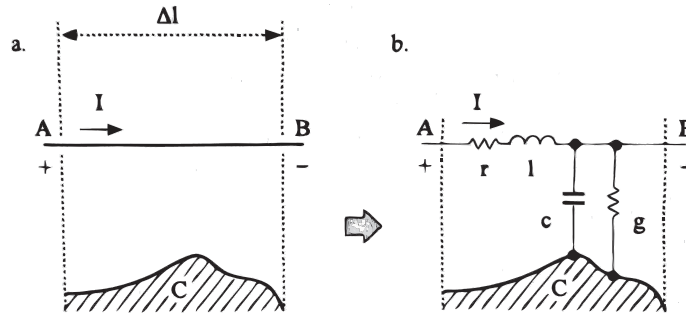


Figura 1.6: Elementi parassiti di un generico tratto circuitale [1].

Dalla figura [1.6] si evince che  $r$  ed  $l$  riducono il valore della corrente mentre  $c$  e  $g$  ne deviano il percorso.

### Resistenza parassita

Si identifica con il termine **Resistenza** la grandezza che definisce l'impedimento che un mezzo pone allo scorrimento di carica in esso stesso. Essa vale:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S} \quad (1.19)$$

Dove  $\rho$  è la resistività del materiale,  $L$  è la lunghezza del conduttore e  $S$  è la sezione del conduttore.

In un conduttore non ideale definiamo **Resistenza parassita**  $R_s$ , quella resistenza non desiderata, dovuta alla non idealità.

Per alte frequenze la corrente non è più uniforme all'interno del conduttore, ma tende a concentrarsi sul suo strato superficiale di spessore  $\delta$ .

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (1.20)$$

Questo effetto, definito **Skin Effect**, causa la riduzione della sezione effettiva del conduttore (di diametro  $D$ ), con conseguente aumento della resistenza parassita  $R_s$ .

$$R_s = \rho \cdot \frac{L}{\pi \delta (D - \delta)} \quad (1.21)$$



Il fenomeno skin effect compare solo dopo una certa frequenza  $f_{ep}$ :

$$f_{ep} = \frac{4 \cdot R_0}{\mu \cdot L} \quad (1.22)$$

Per  $f < f_{ep}$  si avrà che  $\delta = \frac{D}{2}$  (Comportamento *ideale*)

Se  $f \gg f_{ep}$  si avrà che  $\delta$  diventa trascurabile.

L'espressione (1.21) convergerà in:

$$R_s = \rho \cdot \frac{L}{\pi D} \sqrt{\pi f \mu \sigma} = R_0 \cdot \sqrt{\frac{f}{f_{ep}}} \quad (1.23)$$

La figura [1.7] mostra l'andamento della resistenza in funzione di  $f$ .

### Induttanza parassita

La corrente  $i$  che scorre in un conduttore risente, oltre ad un contributo resistivo anche di uno induttivo definito come **induttanza di tratto** o **induttanza parziale**  $L_s$ . Quest'ultima dipende dalla geometria del conduttore e dalla sua conducibilità.

L'impedenza generata dalla induttore parassita è :

$$Z'_s = j\omega L_s \quad (1.24)$$

Si nota immediatamente che l'induttanza ha un andamento al quadrato rispetto alla resistenza parassita  $R_s$ .

Come si osserva in Fig.[1.7], il contributo dell'impedenza compare solo dopo una certa frequenza  $f_{ei}$ :

$$f_{ei} = \frac{1}{2\pi} \frac{R_0}{L_s} \quad (1.25)$$

Per  $f < f_{ei}$  il contributo induttivo è trascurabile rispetto al contributo resistivo  $R_0$  a bassa frequenza.

Per  $f \gg f_{ei}$  si avrà :

$$Z_s = R_0 + R_0 \sqrt{\frac{f}{f_{ep}}} + jR_0 \frac{f}{f_{ei}} \cong R_0 + jR_0 \frac{f}{f_{ei}} \quad (1.26)$$

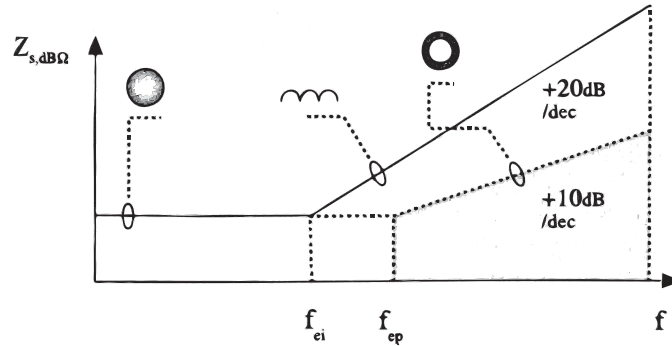


Figura 1.7: Andamento in frequenza del modulo di  $Z_s$  in dB [1].

L'induttanza in serie comporta che la variazione di corrente è limitata, ma anche che, all'interno del cavo si genereranno differenze di potenziale alla stessa frequenza di  $i$ :

$$V_{AB} = j\omega L_s I \quad \Rightarrow \quad v_{AB} = L_s \frac{di}{dt} \quad (1.27)$$

### Capacità e conduttanza parassita

Sia la capacità  $C_p$  che la conduttanza  $G_p$  sono elementi parassiti in parallelo.

Grazie al fenomeno detto **accoppiamento capacitivo**, che si verifica quando due conduttori carichi ricoprono il ruolo di armature di un condensatore, la capacità all'aumentare della frequenza tende a diventare un cortocircuito tra i due conduttori.

La conduttanza parassita rappresenta la possibilità che il dielettrico tra i due conduttori venga rotto, generando un cortocircuito.

La presenza di questi fenomeni parassiti in parallelo determina che la corrente  $I$ , circolante in un conduttore e generata da una tensione sinusoidale  $V$ , non seguirà il percorso ideale  $A-B$ , figura [1.6a]. Infatti una parte di quest'ultima verrà deviata attraverso le non idealità del circuito, figura [1.6b] risultando privata delle componenti  $I'$  e  $I''$  (rispettivamente componente capacitiva e conduttiva).

$$I' = j\omega C_p V \quad \Rightarrow \quad i'_{AB} = C_p \frac{dv}{dt} \quad (1.28)$$

$$I'' = G_p V \quad \Rightarrow \quad i''_{AB} = g_p v \quad (1.29)$$

### 1.4.7 Accoppiamento EM

Le interferenze EM hanno origine dalla sorgente, raggiungono la vittima e si propagano secondo le modalità schematizzate in Fig.[1.8] ed elencate di seguito:

- accoppiamento irradiato;
- accoppiamento condotto;
- accoppiamento capacitivo;
- accoppiamento induttivo;

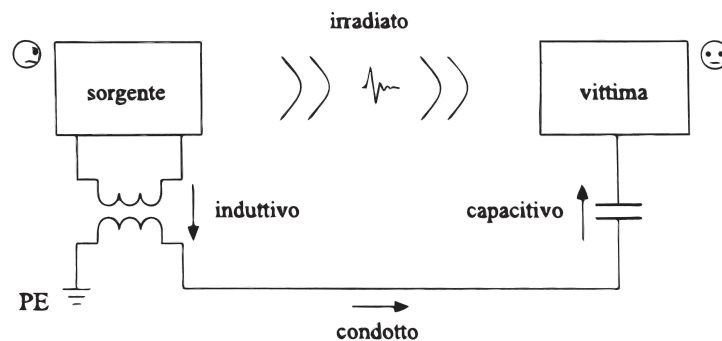


Figura 1.8: Tipi di accoppiamento tra sorgente ed elemento vittima [1].

Dalla figura [1.8] si evince che tre di questi meccanismi di accoppiamento avvengono in aria a causa degli effetti dei campi E, H ed EM, mentre il quarto avviene mediante i cavi di collegamento.

#### Accoppiamento irradiato

"L'**accoppiamento irradiato**, o *radiated coupling* o *accoppiamento EM*, si verifica per mezzo di parti conduttrici di un dispositivo o di un sistema elettronico funzionanti da vere e proprie antenne non intenzionali in trasmissione o ricezione".

Lo studio di fenomeni di emissione e ricezione in applicazioni reali richiederebbe la risoluzione delle equazioni di Maxwell [1.13, 1.14, 1.15, 1.16], ma a causa della complessità geometrica di tali circuiti è preferibile analizzare il problema mediante la *teoria delle antenne elementari* [1].

In Fig.[1.9] vengono illustrate le semplificazioni delle più comuni antenne elementari:

- a) dipolo elettrico elementare;
- b) dipolo magnetico elementare;
- c) antenna a dipolo;
- d) antenna unipolare;
- e) antenna a loop.

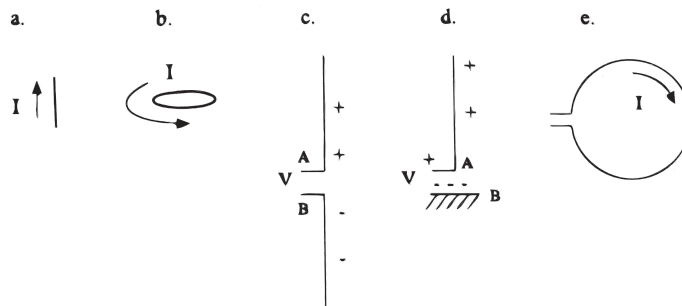


Figura 1.9: Esempi di antenne elementari [1].

In un dispositivo ogni generico tratto conduttore si comporta, intenzionalmente e non, come una vera e propria antenna in ricezione o trasmissione. Pertanto ogni circuito è schematizzabile secondo una o più antenne di figura [1.9].

Quindi durante la progettazione di un circuito si deve prestare particolare attenzione al funzionamento in **risonanza**, infatti ogni sua parte è associata ad un'antenna elementare che avrà una propria frequenza di risonanza. Tale condizione è critica dal punto di vista delle rotture e si verifica quando un sistema oscillante viene sollecitato periodicamente con frequenza pari all'oscillazione propria del sistema stesso.

### Accoppiamento condotto

L'**accoppiamento condotto**, o *conductive coupling*, si verifica tra dispositivi e apparecchi elettrici ed elettronici quando condividono tratti di conduttore con impedenza non nulla, detta **impedenza comune**. Il suo valore è tipicamente basso, ma non per questo trascurabile, infatti rappresenta un potenziale mezzo di trasmissione dei disturbi da un circuito all'altro.

### Accoppiamento capacitivo

"L'**accoppiamento capacitivo**, o *crosstalk capacitivo*, si verifica tra circuiti funzionanti paralleli e a distanza ravvicinata, ossia inferiore alla lunghezza d'onda  $\lambda$ <sup>1</sup> (e.g. conduttori di un cavo multifilare). Esso avviene attraverso la generazione e la ricezione di un campo elettrico coulombiano  $E_c$ ".

In generale si può parlare di *crosstalk* quando in due conduttori vicini e paralleli, uno si comporta da elemento disturbante mentre l'altro da vittima. La presenza di una tensione variabile (generata da un generatore di tensione reale) nel primo conduttore crea una separazione di cariche. Essa genera un campo elettrico coulombiano  $E$  il quale induce delle correnti a circolare tra il secondo conduttore ed il piano di massa in comune che potrebbero causare di disturbi.

### Accoppiamento induttivo

"L'**accoppiamento induttivo**, anche noto come *crosstalk induttivo*, è un fenomeno di interferenza tra circuiti funzionanti a distanze ravvicinate, ossia inferiore alla lunghezza d'onda  $\lambda$ . Esso avviene attraverso la generazione e la ricezione di un campo magnetico  $H$ ".

Anche nell'accoppiamento di tipo induttivo, in un caso generico si può parlare di *crosstalk* quando in due conduttori vicini e paralleli, uno si comporta da elemento disturbante mentre l'altro da vittima. La presenza di un generatore di tensione variabile (generatore di tensione reale) causa lo scorrimento di una corrente  $I_1$  nel primo conduttore. Quest'ultima genera un campo magnetico  $H_1$  le cui linee di campo si concatenano con l'area del circuito vittima (conduttore due e il piano di massa). Si verrà a generare quindi una corrente indotta  $I_2$  e una differenza di potenziale sulle impedenze del circuito due. La corrente  $I_2$  genererà a sua volta un campo  $H_2$  che si oppone ad  $H_1$  e potrebbe inoltre, essere causa di disturbi.

I fenomeni di accoppiamento capacitivo e induttivo manifestano i loro effetti contemporaneamente sul circuito vittima. Per questo motivo si può trarre beneficio in ambito EMC da una buona progettazione del layout

---

<sup>1</sup>In un'onda periodica, la **lunghezza d'onda** è la distanza tra due creste o due ventri successivi.

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

in cui  $c$  è la *velocità della luce* ed  $f$  è la frequenza di variazione dell'onda.

circuitale. In questo modo sul carico del circuito vittima il contributo capacitivo si compenserà con quello induttivo.

# Capitolo 2

## Teoria del sistema esaminato

In questo capitolo verranno esaminate, in via teorica, le principali tematiche riguardo al protocollo CANbus e le relative cause di interferenza elettromagnetica che lo affliggono. Questo in previsione di comprendere chiaramente le problematiche e i relativi accorgimenti affrontati nel sistema studiato, fisicamente presente nell'azienda Dragflow.

### 2.1 Teoria del CANbus

#### 2.1.1 Storia ed evoluzione

Il Controller Area Network, comunemente conosciuto come CANbus, rappresenta una delle innovazioni più significative nel campo delle comunicazioni automobilistiche e industriali. Nato dalla crescente necessità di avere un sistema di comunicazione robusto ed efficiente in grado di gestire l'aumento di dispositivi elettronici nei veicoli, il CANbus ha rivoluzionato la connettività tra dispositivi. Prima della sua introduzione, ogni dispositivo in un veicolo o sistema industriale richiedeva un cablaggio dedicato, portando a sistemi complessi e spesso ingombranti. Il CANbus ha offerto una soluzione standardizzata per permettere a molteplici dispositivi di comunicare attraverso un singolo bus, rendendo le architetture più snelle e gestibili.

La sua origine si colloca agli inizi degli anni '80, quando la Robert Bosch GmbH iniziò a sviluppare questa tecnologia in risposta alle crescenti esigenze dell'industria automobilistica. Dopo il suo lancio, diverse organizzazioni hanno riconosciuto il potenziale del CANbus e hanno iniziato a adottarlo. Oltre al settore automobilistico, il CANbus ha trovato applica-

zione in molti altri settori, tra cui l'automazione industriale, l'avionica e la medicina, diventando uno standard de facto per la comunicazione seriale.

### 2.1.2 Principi fondamentali

Il CANbus opera secondo un principio di comunicazione multi-master, ciò significa che ogni dispositivo sulla rete (o nodo) ha la capacità di iniziare una trasmissione non appena ritiene che la rete sia libera. Come si evince dalla Fig.[2.1], durante la trasmissione, se due o più nodi iniziano a trasmettere contemporaneamente il sistema di arbitraggio del CANbus entra in gioco. Questo meccanismo di arbitraggio è basato sulla priorità dei messaggi: messaggi con ID numerico più basso hanno priorità più alta rispetto a quelli con ID più alto. Pertanto, in caso di collisioni, il nodo con l'ID più basso "vince" e continua la sua trasmissione, mentre gli altri nodi ritardano le loro trasmissioni. Riguardo ai formati di messaggio, il CANbus offre due opzioni principali: il formato standard (CAN 2.0A) con un campo ID di 11 bit, e il formato esteso (CAN 2.0B) che utilizza un campo ID di 29 bit, permettendo una maggiore flessibilità e scalabilità nella definizione degli ID dei messaggi.

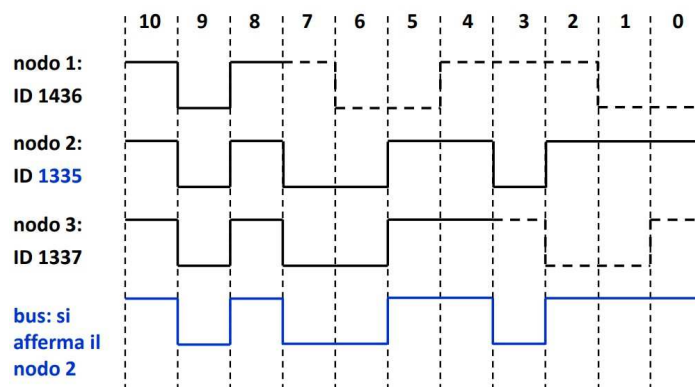


Figura 2.1: Priorità messaggi CANbus [2].

### 2.1.3 Piano fisico

Il protocollo CANbus si basa su una topologia di bus differenziale, in cui sono presenti due conduttori principali: CAN-High (CAN-H) e CAN-Low (CAN-L). Come si può notare da Fig. [2.2], la comunicazione avviene attraverso la differenza di tensione tra questi due fili. Quando la rete è in uno stato recessivo (cioè non sta trasmettendo dati), entrambi i fili



presentano la stessa tensione. Durante una trasmissione, CAN-H aumenta la sua tensione mentre CAN-L la diminuisce, creando così una differenza di tensione che rappresenta il bit trasmesso.

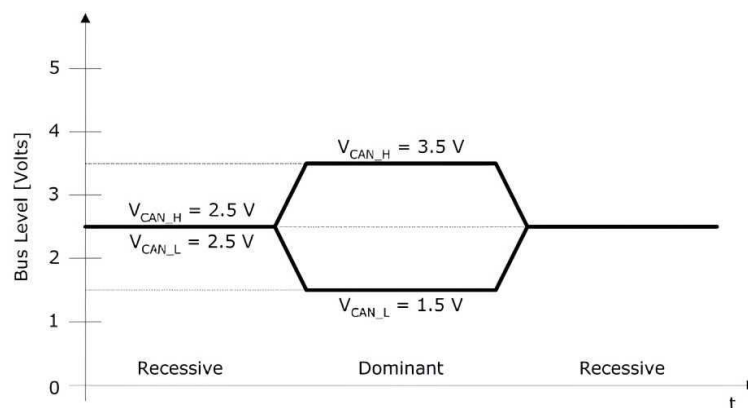


Figura 2.2: Livelli CANbus [4].

Per garantire l'integrità del segnale e minimizzare le riflessioni indesiderate, è essenziale che il bus CAN sia terminato correttamente alle sue estremità. Questo si ottiene solitamente con una resistenza di terminazione di 120  $\Omega$ . In figura [2.3] è rappresentata una schematizzazione di una linea CANbus in cui si nota come sia collegata tale terminazione in ogni nodo della rete.

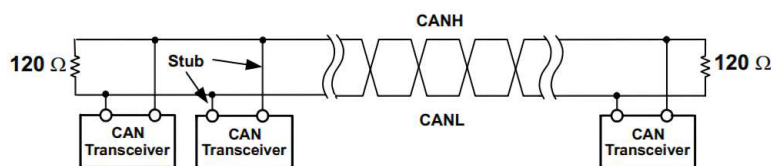


Figura 2.3: Esempio di linea CANbus [5].

La velocità di trasmissione del CANbus può variare notevolmente a seconda delle esigenze dell'applicazione e della lunghezza del bus. In generale, maggiore è la distanza, minore sarà la velocità di trasmissione possibile. La tabella 2.1 mostra la relazione tra velocità e lunghezza del bus.

Velocità (kbps)	Lunghezza massima (m)
1000	40
500	100
250	250
125	500
50	1000
20	2500
10	5000

Tabella 2.1: Speed rate in rapporto alla lunghezza della linea

### 2.1.4 Struttura dei messaggi e formattazione

Il protocollo CANbus utilizza un formato di messaggio ben definito per garantire una comunicazione efficiente e affidabile tra i nodi. La Fig. [2.4] spiega come ogni messaggio, o frame, sia composto dalle seguenti parti:

- **SOF (Start of Frame)**: indica l'inizio della trasmissione del frame;
- **ID**: identifica il mittente del messaggio e determina la priorità del frame nella rete;
- **RTR (Remote Transmission Request)**: specifica se il frame è un messaggio di dati standard o una richiesta di dati;
- **IDE (Identifier Extension)**: indica se l'ID del frame è nel formato standard o esteso;
- **DLC (Data Length Code)**: specifica il numero di byte di dati nel frame;
- **DATA**: contiene i dati effettivi trasmessi;
- **CRC (Cyclic Redundancy Check)**: fornisce un meccanismo di controllo degli errori per garantire l'integrità dei dati;
- **ACK (Acknowledgment)**: conferma la ricezione corretta del frame;
- **EOF (End of Frame)**: indica la fine della trasmissione del frame.

La codifica dei messaggi garantisce che i dati siano inviati in un formato standardizzato, mentre la decodifica li converte nuovamente in un formato utilizzabile dal ricevente. Questi processi sono essenziali per garantire che

tutti i nodi su una rete CANbus possano comunicare in modo efficace e senza ambiguità.

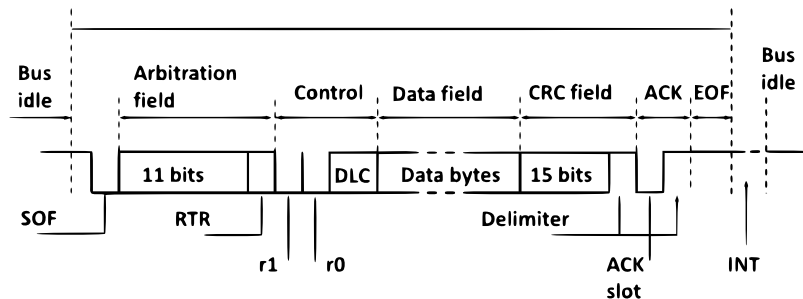


Figura 2.4: Composizione di un messaggio CANbus [2].

## 2.2 Malfunzionamenti della linea CAN

Di seguito vengono descritti in dettaglio i principali problemi riscontrabili a livello di trasmissione:

- Errori di bit:** nella comunicazione CAN, ogni nodo che trasmette un messaggio sul bus esegue anche un'operazione di ascolto per assicurarsi che ciò che ha trasmesso sia stato ricevuto correttamente da tutti gli altri nodi. Gli errori di bit emergono quando c'è una discrepanza tra ciò che il nodo ha trasmesso e ciò che rileva sul bus durante questa fase di ascolto. Questi errori possono essere causati da varie fonti di interferenza, come rumore elettromagnetico o fluttuazioni di tensione. Quando si verificano errori di bit, può diventare estremamente difficile per i nodi decodificare e comprendere correttamente i messaggi, portando a possibili malfunzionamenti nella comunicazione;
- Problemi di temporizzazione:** la natura sincrona della comunicazione CAN richiede che tutti i nodi sul bus siano perfettamente sincronizzati in termini di temporizzazione. Se, a causa di interferenze o altri fattori, un nodo perde la sincronizzazione, può causare una vasta gamma di problemi. Ad esempio, se due nodi tentano di trasmettere messaggi contemporaneamente a causa di una mancata sincronizzazione, può verificarsi una collisione. Questo non solo interrompe la comunicazione corrente, ma può anche ritardare o interrompere la trasmissione di messaggi futuri;

- **Errore di frame:** la comunicazione CAN si basa su una struttura specifica di messaggi, o "frame", che deve essere rispettata affinché i messaggi vengano interpretati correttamente. Se, a causa di interferenze o distorsioni del segnale, un frame viene ricevuto in una forma che non rispetta questa struttura, il nodo rileverà un errore di frame. Questi errori sono particolarmente problematici perché indicano che il messaggio ricevuto è fondamentalmente corrotto e, pertanto, non può essere utilizzato o interpretato correttamente dal nodo ricevente;

In particolare, nel sistema analizzato, si è riscontrato che il ricevitore del segnale CAN era frequentemente in uno stato di errore di frame a causa dei disturbi elettromagnetici sulla linea. Ad indicare che i messaggi ricevuti erano danneggiati, compromettendo così la corretta comunicazione tra i nodi del bus.

### 2.2.1 Gestione errori

Una delle caratteristiche salienti del protocollo CANbus è la sua capacità di rilevare e gestire gli errori in modo efficiente. Ci sono vari tipi di errori che possono verificarsi, come errori di bit, errori di formato e errori di CRC. Il CANbus è dotato di meccanismi integrati per identificare tali errori.

Una volta rilevato un errore, il nodo che lo ha individuato invia un frame di errore per notificare agli altri nodi del problema. A seconda della gravità e della frequenza degli errori, un nodo può trovarsi in uno dei tre stati di errore:

- **Error Active:** in questo stato, il nodo funziona normalmente e può sia trasmettere che ricevere messaggi;
- **Error Passive:** se un nodo rileva troppi errori, entra in uno stato passivo, in cui ha limitazioni nella trasmissione;
- **Bus Off:** in caso di errori persistenti e gravi, un nodo può essere disconnesso dal bus e necessita di una reinizializzazione per riprendere la comunicazione.

Questi meccanismi di gestione degli errori garantiscono che il CANbus rimanga una rete di comunicazione affidabile, anche in presenza di interferenze o guasti.

### 2.2.2 Vantaggi e svantaggi

Il CANbus, presenta una serie di caratteristiche distintive:

#### Vantaggi:

- **Robustezza:** la capacità di resistere alle interferenze e di funzionare in ambienti rumorosi rende il CANbus una scelta ideale per applicazioni critiche;
- **Scalabilità:** la rete permette l'aggiunta di nuovi dispositivi senza necessità di grandi modifiche;
- **Riduzione del cablaggio:** il CANbus semplifica il sistema di cablaggio, portando a una riduzione dei costi e della complessità.

#### Svantaggi:

- **Larghezza di banda limitata:** potrebbe non essere adeguata per applicazioni ad alta velocità;
- **Complessità:** la progettazione e il debug possono richiedere una formazione specifica;
- **Gestione degli errori:** sebbene il CANbus possieda funzionalità di gestione degli errori, le preoccupazioni sulla sicurezza possono richiedere ulteriori misure.

### 2.2.3 Applicazioni e casistiche

Il CANbus è adottato in una vasta gamma di applicazioni. Nel settore automobilistico, è diventato lo standard de facto per la comunicazione tra moduli e sensori. Nell'automazione industriale, viene utilizzato per interconnettere dispositivi, dalla robotica ai PLC. Nel settore dell'avionica, il CANbus è fondamentale per la comunicazione tra i sistemi di bordo.

Oltre a questi, esistono numerose altre casistiche in cui il CANbus si è dimostrato essenziale. Che si tratti di monitorare le risorse energetiche in un'installazione solare o di gestire i sistemi di irrigazione in agricoltura, la sua presenza è la norma in molte industrie moderne.

## 2.3 Problematiche legate all'utilizzo dell'inverter

Le rapide transizioni  $\frac{dv}{dt}$  degli IGBT<sup>1</sup> dell'inverter aumentano la possibilità di generare disturbi digitali, con frequenza che varia tra **250 kHz** e i **6 MHz**, che interferiscono con l'apparecchiatura sensibile del sistema in esame, soprattutto in prossimità dell'inverter stesso.

Tali disturbi si manifestano principalmente come *correnti di modo comune*, *correnti digitali* e *correnti di ritorno*, quest'ultime che si propagano nei cavi tra driver e carico.

### 2.3.1 Correnti digitali

Le correnti digitali sono molto disturbanti dal punto di vista EMC, poiché hanno le seguenti caratteristiche:

- elevata frequenza ( $f_0$ );
- bassi tempi nel cambio di valori ( $t_r, t_f$ ).

La forma d'onda della corrente varia in base al tipo di carico come mostrato in Fig.[2.5]:

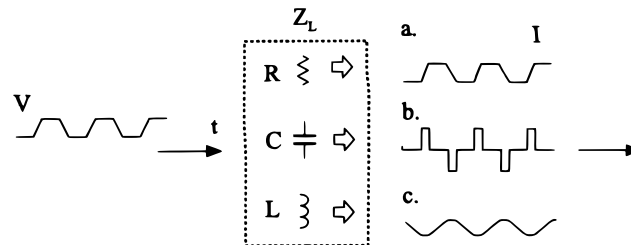


Figura 2.5: Forma d'onda corrente digitale in funzione del tipo di carico [1].

Per migliorare il contenuto armonico di un segnale digitale è possibile agire sui suoi seguenti parametri:  $t_r^2$  e  $t_f^3$  o  $f_0$ .

<sup>1</sup>Un IGBT è un dispositivo a semiconduttore usato come interruttore elettronico in applicazioni ad alta potenza, cioè è in grado di commutare alte tensioni e alte correnti.

<sup>2</sup>Con  $t_r$  si definisce il *tempo di rise*, ossia il tempo necessario al segnale per passare dal 10% al 90% del suo valore massimo.

<sup>3</sup>Con  $t_f$  si definisce il *tempo di fall*, ossia il tempo necessario al segnale per passare dal 90% al 10% del suo valore massimo.

In particolare:

- $f_0$  è la frequenza del segnale definita dal PWM;
- $t_r$  e  $t_f$  dipendono dal carico R-L e dallo *slew rate*<sup>4</sup> degli IGBT.

Un'altra possibilità è quella di agire sul carico induttivo o resistivo. E' possibile quindi aggiungere un carico induttivo (L), per migliorare il contenuto armonico. Questo tuttavia contribuirà ad un peggioramento del fattore di potenza del motore. E' possibile, inoltre, aumentare il carico resistivo (R), ottenendo, tuttavia, un'attenuazione dell'ampiezza della corrente di alimentazione.

### 2.3.2 Correnti di modo comune e differenziale

Generalmente, in un circuito in cui si riconosce un trasmettitore  $Tx$  ed un ricevitore  $Rx$ , è presente una coppia di cavi di cui uno sarà di andata e uno di ritorno. Tale situazione è rappresentata nella figura [2.6]. Si possono distinguere due casi:

- il caso ideale, dove le correnti di andata e di ritorno si presentano nella forma differenziale **MD** e vale perciò:

$$I_1 = -I_2 \quad (2.1)$$

- il caso reale, in cui una parte della corrente di andata  $I_1$  ritorna alla sorgente seguendo un percorso diverso, definito come **ground loop**, da quello della corrente di ritorno  $I_2$ . Si potranno distinguere le due componenti della corrente: una di modo differenziale ed una di modo comune.

$$I_{MD} = \frac{I_1 + I_2}{2}, \quad (2.2)$$

$$I_{MC} = \frac{I_1 - I_2}{2}. \quad (2.3)$$

---

<sup>4</sup>Lo *slew rate* è la velocità con cui un dispositivo elettrico risponde, in uscita, ad un segnale impulsivo ricevuto in ingresso. Tale parametro di misura in V/s.

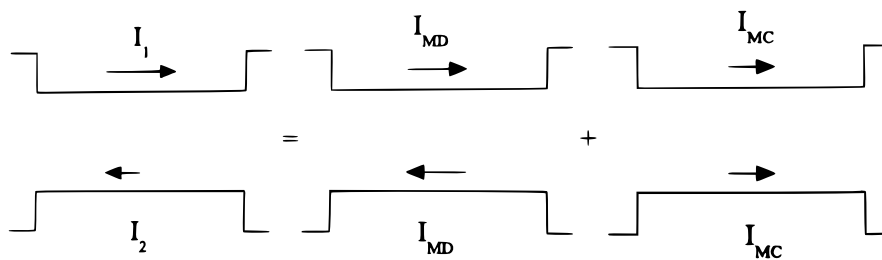


Figura 2.6: Scomposizione di una coppia di correnti in MD e MC [1].

La figura [2.6] illustra come una generica coppia di correnti in un circuito è sempre scomponibile come la somma di una corrente di modo comune e una di modo differenziale.

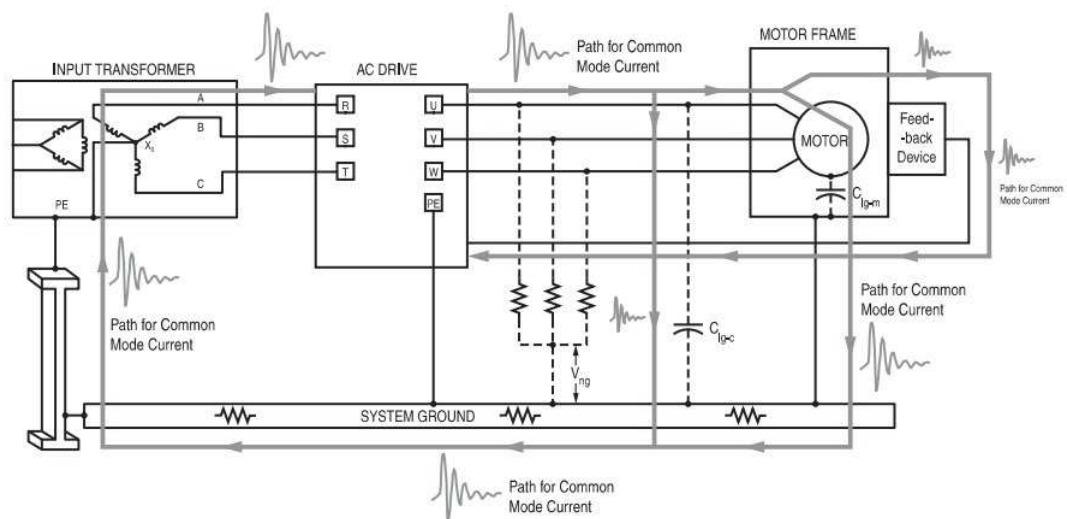


Figura 2.7: Percorsi della corrente di modo comune [13].

La figura [2.7] mostra alcuni esempi di **ground loop** per le correnti di modo comune in un sistema *driver-motore trifase*. Come si può vedere comprende parti circuitali anche molto diverse fra loro ad esempio: il cavo di collegamento, capacità ed induttanze, il circuito di massa di segnale e di alimentazione, il circuito di protezione, il telaio metallico del driver, la carcassa ed altri elementi del carico.

Come si può notare dalla figura tali percorsi hanno un'estensione molto maggiore del percorso seguito dalle correnti di **modo differenziale MD** e per questo motivo a parità di corrente, la  $I_{MC}$  causa un irraggiamento dei campi  $E$  e  $H$  maggiore rispetto a  $I_{MD}$ .



### 2.3.3 Correnti di ritorno

In un circuito elettrico o elettronico la corrente circolante deve sempre ritornare alla sorgente; il percorso di ritorno, dato l'elevato numero di componenti del circuito e la loro complessità, è spesso difficile da individuare in modo chiaro.

In generale vale che la corrente nel ritornare alla sorgente percorre il tratto più vicino al percorso di andata, che minimizza l'area tra quest'ultimo ed il percorso di ritorno. Tale percorso è inoltre quello a minor impedenza, sede di alcuni disturbi ad alta frequenza.

## 2.4 Soluzioni Software

La presenza di una centralina PLC nel quadro elettrico, basata su microprocessore, rende necessari alcuni accorgimenti software per irrobustire il sistema di controllo della macchina contro i fenomeni EMI. Come descritto nel paragrafo (2.3) di questo capitolo, la presenza dell'inverter a PWM introduce disturbi impulsivi che determinano un'alterazione di qualche bit nel software compromettendo l'informazione trasmessa. Il sistema può essere programmato per rilevare malfunzionamenti e di conseguenza procedere con l'eventuale risoluzione, mediante i seguenti accorgimenti:

### 1. Interruzioni non utilizzate

Quando le linee di interruzione non impiegate vengono attivate dalle interferenze EM, la CPU salva lo stato attuale della macchina e memorizza l'indirizzo della routine di servizio associata alla richiesta di interrupt sul program counter. Siccome l'indirizzo in questione non è predisposto, nella CPU viene caricato un valore casuale della tabella degli indirizzi. Tali complicazioni possono essere aggirate programmando opportune routine che verranno eseguite solamente in corrispondenza dell'abilitazione delle sole richieste di interrupt necessarie. Quest'ultime consentono infine di ritornare al programma principale, non correttamente interrotto;

### 2. Verifica dati

Con l'utilizzo di specifici algoritmi è possibile controllare la validità dei dati inviati e ricevuti e procedere con l'eventuale ripristino dei malfunzionamenti. L'utilizzo del CANbus come protocollo per la comunicazione risulta essere una scelta consigliata in quanto mette a disposizione diversi strumenti software per la gestione degli errori, come visto nei paragrafi di questo capitolo;

### 3. Watchdog

E' un sistema di temporizzazione che permette al programma di controllo di uscire da loop di funzionamento infiniti o da deadlock<sup>5</sup>. Sono realizzati con contatori all'indietro che vengono resettati con una certa periodicità prima che il conteggio giunga allo zero. Nel caso in cui non avvenga il reset e di conseguenza si raggiunge il valore finale di conteggio, viene rilevata un'anomalia e automaticamente eseguita una richiesta di interrupt con la relativa routine di servizio. Particolari watchdog possono innescare inoltre azioni di sistemi di controllo per effettuare operazioni di messa in sicurezza di apparati secondari come ad esempio, spegnimento di motori, alimentazioni o altro, in attesa che la condizione di errore venga eliminata;

### 4. Memoria di programma non utilizzata

La memoria istruzioni del microprocessore che non viene utilizzata dal programma è preferibile occuparla con comandi NOP<sup>6</sup> con salto, alla fine, ad una routine di gestione errori. In questo modo si evita che il programma, a causa di interferenze elettromagnetiche, salti all'interno di porzioni di area libera della memoria;

---

<sup>5</sup>Indica una situazione in cui due o più processi o azioni si bloccano a vicenda, creando una situazione di stallo.

<sup>6</sup>Istruzione che indica nessuna operazione.

# Capitolo 3

## Sistema fisico

Nei successivi paragrafi verranno elencate e descritte in dettaglio le componenti che costituiscono il sistema oggetto di studio.

Esso è costituito da una pompa elettrica(3.1) collegata con un cavo multipolare (3.4) ad un inverter(3.2), che provoca dei disturbi su una rete CANbus (3.3) la quale permette la comunicazione tra i sensori (3.5), presenti sulla pompa e il quadro di controllo in cui risiede un PLC. Ogni componente sarà accompagnata dalle sue specifiche tecniche, al fine di fornire una visione chiara e completa del contesto operativo.

Saranno poi commentate adeguatamente le soluzioni pratiche adottate dai progettisti dell'azienda, scelte per mitigare gli effetti delle interferenze elettromagnetiche.

In fine verranno proposti ulteriori accorgimenti da implementare in futuro in ottica di migliorare il funzionamento EMC del sistema.

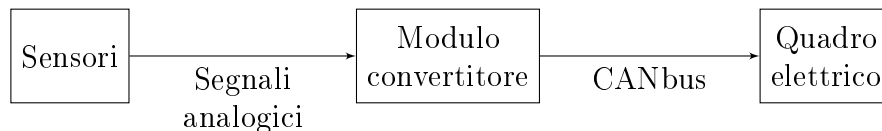


Figura 3.1: Diagramma a blocchi del sistema

### 3.1 Pompa elettrica

Il motore utilizzato per questa prova è un asincrono trifase prodotto da ISGEV ideato per pompe elettriche, in Fig. [3.2] se ne può apprezzare un modello. Il motore è posizionato su un banco prova per avere facile accesso alla scatola della morsetteria dove sono alloggiati i cavi provenienti dai

sensori e il modulo di controllo.

### Specifiche tecniche

- **Tensione:** 400 V<sub>eff</sub> AC
- **Frequenza:** 50 Hz
- **Potenza:** 75 kW
- **Fattore di potenza:** 0.89
- **Corrente nominale:** 131 A
- **Classe di isolamento:** H
- **Tipo di servizio:** S1
- **Grado di protezione:** IP58



Figura 3.2: Targhetta motore



Figura 3.3: Foto motore su banco prova

La figura [3.2] rappresenta la targa del costruttore in cui sono specificati i parametri del motore elettrico rappresentato in Fig.[3.3]. In quest'ultima immagine si nota la tecnologia adottata dall'azienda per le proprie applicazioni.

## 3.2 Inverter

L'inverter utilizzato nel sistema è il modello FDU48-650, Fig. [3.4], prodotto da Emotron e alloggiato in un quadro elettrico dotato di ventole per la dissipazione del calore. L'inverter è programmato tramite pannello su fronte quadro secondo le specifiche del motore, attua inoltre una rampa di accelerazione da 0 a 50Hz in 10 secondi, oppure da 0 a 1480rpm in termini di rotazioni al minuto. Data la possibilità di variare la frequenza di alimentazione sarà possibile misurare i disturbi sul cavo in funzione della stessa.

### Specifiche tecniche

- **Tensione nominale:**  $3 \times 230 \div 480\text{V}$
- **Frequenza nominale:**  $45 \div 65\text{Hz}$
- **Corrente nominale:** 650 A



Figura 3.4: Targhetta inverter



Figura 3.5: Foto quadro inverter

La figura [3.4] rappresenta la targa del costruttore in cui sono specificati i parametri dell'inverter, esso è installato all'interno di un quadro di comando illustrato in Fig.[3.5].

## 3.3 Modulo CANbus

All'interno della scatola del motore è presente un dispositivo essenziale per la conversione dei segnali, ovvero il CC16WP prodotto da MRS Electronic.



Figura 3.6: Modulo CC16WP MRS Electronic [11].

Il modulo, illustrato in Fig. [3.6], è programmabile in linguaggio C e ha il compito di accentrare e convertire i segnali provenienti dai vari sensori della pompa in formato CANbus direttamente nella scatola del motore.

#### Specifiche tecniche

- **Ingressi:** 6 analogici e 1 digitale con 12 Bit di risoluzione
- **Interfacce CAN:** 2
- **Tensione operativa:**  $9 \div 32$  V
- **Intervallo di temperatura:**  $-40 \div +85$  °C

### 3.4 Cavo

In Fig. [3.7] è riportata la sezione del cavo prodotto da Flamar, il quale ha le seguenti funzionalità:

1. fornire al motore elettrico la potenza in trifase mediante tre cavi di sezione  $10\text{mm}^2$ ;
2. fornire il riferimento di terra per la carcassa della pompa mediante un cavo di sezione  $10\text{mm}^2$ ;
3. trasmettere l'alimentazione 24 V DC mediante una coppia di cavi schermati di sezione  $1\text{mm}^2$ ;
4. trasmettere il segnale CANbus mediante una coppia di cavi schermati di sezione  $1.5\text{mm}^2$ .

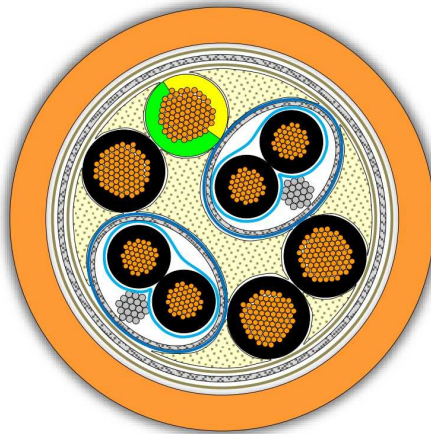


Figura 3.7: Sezione del cavo [10].

Le coppie di cavi di segnale sono dotate di un nastro protettivo in PET avvolto attorno alla schermatura, in questo modo è possibile far compiere al cavo delle curve angolate senza compromettere la schermatura stessa. Il motore elettrico della pompa in questione richiederebbe una sezione di almeno  $35\text{mm}^2$  ma dato che le prove si svolgeranno a vuoto, ovvero con la pompa in aria e quindi senza carico, è stato possibile utilizzare una sezione inferiore.

#### Specifiche tecniche

- **Lunghezza:** 30 metri
- **Materiale isolante:** Poliuretano
- **Configurazione:**  $4\text{G}10 + 2 \times 1,0 + 2 \times 1,5 \text{ mm}^2$
- **Schermatura globale:** Treccia di alluminio
- **Schermatura coppie:** Treccia di alluminio + nastro PET
- **Tensione d'esercizio:**  $0,6 \div 1,0 \text{ kV}$
- **Intervallo di temperatura:**  $-50 \div +80 \text{ }^\circ\text{C}$

### 3.5 Sensori

All'intero del sistema studiato sono presenti quattro sensori, alloggiati nel motore e in prossimità della morsettiera, quali:

- PTC
- PT100
- Inclinometro
- Pressostato

I dati provenienti da questi sensori vengono prima convertiti e poi trasmessi sul CANbus da un apposito modulo convertitore che fa anche da accentratore.

### 3.5.1 PTC

La sonda PTC (Positive Temperature Coefficient) è un sensore termistore utilizzato per monitorare la temperatura. La figura [3.8] illustra lo spaccato di un avvolgimento, all'interno del quale si può notare la presenza di un sensore PTC.



Figura 3.8: Sensore PTC [8].

Nel contesto del sistema esaminato, una serie di tre PTC è installata negli avvolgimenti del motore direttamente dal produttore. Questa scelta è motivata dalla necessità di rilevare e prevenire eventuali sovratemperature che potrebbero danneggiare il motore.

Per rilevare velocemente un eventuale problema di sovratemperatura è sufficiente l'intervento di un solo sensore PTC.

#### Specifiche tecniche

- **Campo di misura:**  $90 \div 160$  °C
- **Tensione di esercizio:**  $2,5 \div 24$  V DC
- **Segnale di uscita:** resistivo



### 3.5.2 PT100

Il sensore PT100 è un sensore che sfrutta la variazione della resistenza del platino in funzione della temperatura. In figura [3.9] è riportato un esempio di sonda temperatura PT100. Il sensore è caratterizzato da una resistenza



Figura 3.9: Sensore PT100 a 3 fili [9].

di  $100 \Omega$  a  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ . Nel contesto del nostro sistema, il sensore è installato all'interno del motore direttamente dal produttore in configurazione a tre fili, questa scelta contribuisce a compensare eventuali cadute di tensione lungo i cavi, assicurando letture di temperatura più accurate e affidabili. Monitorare con precisione la temperatura del motore è fondamentale per comprendere se l'operatore ha fatto un uso corretto della pompa nonché per identificare eventuali problemi di surriscaldamento che si protraggono nel tempo.

#### Specifiche tecniche

- **Campo di misura:**  $0 \div 250 \text{ }^\circ\text{C}$
- **Grado di precisione:**  $\pm 0.3 \text{ }^\circ\text{C}$
- **Segnale di uscita:** resistivo

### 3.5.3 Inclinometro

Nel sistema in esame, viene utilizzato l'IFM JN2201, un dispositivo progettato per rilevare l'inclinazione rispetto a un piano orizzontale. La Fig.[3.10] mostra un esempio di tale dispositivo.



Figura 3.10: Inclinometro IFM JN2201 [12].

Il sensore sarà alloggiato all'interno della scatola del motore ed è fondamentale per il monitoraggio della posizione della pompa rispetto al fondale, con il fine di ottimizzare l'aspirazione di materiale.

#### Specifiche tecniche

- **Campo di misura:**  $-45 \div 45^\circ$
- **Grado di precisione:**  $\pm 0,01^\circ$
- **Assi di misura:** 2
- **Tensione di esercizio:**  $9,2 \div 30$  V DC
- **Range di temperatura:**  $-40 \div 85^\circ\text{C}$
- **Segnali di uscita:** 4...20 mA

#### 3.5.4 Pressostato

Nel sistema in esame viene fatto uso del sensore STLV prodotto da Nuova Fima.



Figura 3.11: Pressostato Nuova Fima STLV [7].

In Fig. [3.11] è illustrato tale pressostato utilizzato per rilevare la profondità della pompa in acqua, lo scopo è quello di garantire un'operatività ottimale e assicurare una rimozione uniforme del materiale dal fondo.

#### Specifiche tecniche

- **Campo di misura:**  $0 \div 10$  bar
- **Accuratezza:**  $\pm 0,35\%$  del campo
- **Temperatura del fluido:**  $-10 \div +60$  °C
- **Segnale di uscita:** 4...20 mA

## 3.6 Soluzioni pratiche

L'azienda Dragflow, nel progetto del sistema qui studiato, ha implementato certe soluzioni tecniche per attenuare la propagazione dei disturbi attraverso i cavi. Altre proposte di miglioria verranno discusse di seguito.

### 3.6.1 Contenimento dei disturbi con il cablaggio

Il tipo di cavo è fondamentale per stabilire la capacità di contenimento dei disturbi in un sistema con inverter integrato.

In una prima fase, i progettisti dell'azienda hanno scelto di utilizzare due cavi distinti senza schermatura, rispettivamente per l'alimentazione e per la linea CAN, per ridurre i costi. Infatti data l'elevata distanza di collegamento tra driver e motore circa 60-70 metri non era contemplato l'utilizzo

di cavi che adottassero particolari tecnologie contro i disturbi elettromagnetici.

Durante la posa dei cavi non sono stati presi accorgimenti circa la distanza tra i cavi segnale e i cavi di alimentazione poiché l'applicazione per pompe sommerse non lo consentiva. Questo chiaramente ha fatto in modo che i disturbi intaccassero la linea dati, pertanto la scelta di optare per un cavo multipolare con schermatura di buona qualità si è resa indispensabile a discapito di un costo finale maggiore dell'impianto.

Questa scelta è risultata fondamentale per minimizzare le riflessioni del segnale e garantire una trasmissione di esso più fluida e coerente.

Infatti, il percorso di ritorno predominante per i disturbi di modo comune è lo schermo stesso quando vengono utilizzati cavi di alimentazione schermati.

Il parametro che caratterizza la qualità schermante di un cavo in frequenza è l'**impedenza superficiale di trasferimento**  $Z_T$ .

$$Z_T = \frac{V_L}{I_S} \quad (3.1)$$

dove  $V_L$  è la tensione che si produce sulla linea di segnale all'interno di un cavo di lunghezza opportuna, come illustrato in Fig. [3.13], a causa del passaggio di una corrente uniforme  $I_S$  sulla superficie dello schermo, e la corrente  $I_S$  stessa. Dimensionare in modo opportuno il cavo in base alle caratteristiche dello spettro del segnale rumoroso significa ottenere un andamento in frequenza dell'impedenza di trasferimento come rappresentato in Fig.[3.12]. Se scelto correttamente un cavo schermato, grazie a questo parametro, permette di attenuare significativamente qualsiasi tipo di disturbo elettromagnetico.

### effetto schermante

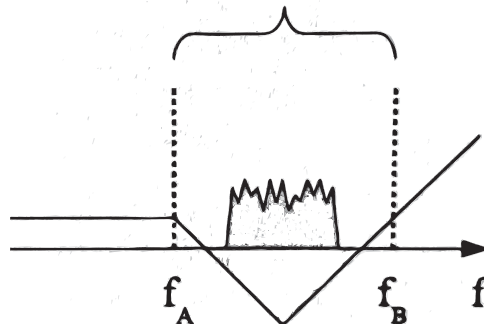


Figura 3.12: Andamento in frequenza di  $Z_T$  [1].

NORMA TECNICA CEI UNEL 36761:2009-04					
Prescrizioni per le prove di efficacia di schermatura					
Classe	Attenuazione di schermatura minima (db)			Impedenza di trasferimento max. (mΩ/m)	
	30 < f < 1000 MHz	1000 < f < 2000 MHz	2000 < f < 3000 MHz	5 < f < 30 MHz	
Classe A++	105	95	85	Classe A++	0,9
Classe A+	95	85	75	Classe A+	2,5
Classe A	85	75	65	Classe A	5
Classe B	75	65	55	Classe B	15

Figura 3.13: Classi di schermatura secondo normativa CEI [14].

La figura [3.13] è tratta dalla norma tecnica CEI UNEL 36761:2009-04 e pone delle basi dalle quali partire quanto si necessita di introdurre un cavo schermato nella fase di progetto di un sistema. A differenza dei *conduit*<sup>1</sup>, lo schermo è isolato contro il contatto accidentale dalla terra da un rivestimento esterno di TPE<sup>2</sup>. In questo modo, la maggior parte della corrente di disturbo fluisce nel percorso controllato e una piccolissima quantità di disturbi in alta frequenza finisce nel percorso di terra.

<sup>1</sup>Un *conduit* è un tubo usato in ambito civile ed industriale per la protezione e l'instradamento dei cavi in un cablaggio.

<sup>2</sup>TPE è il nome utilizzato per definire un Elastomero Termoplastico, denominato anche gomma termoplastica.

La corrente di disturbo di ritorno sullo schermo o sul cavo di terra di sicurezza viene instradata verso il morsetto PE dell'inverter, il bus di terra PE dell'armadio elettrico e, quindi, direttamente verso il neutro collegato a terra<sup>3</sup> del trasformatore di alimentazione dell'inverter. In figura [3.14] è mostrata la modalità con cui è eseguito questo collegamento, essa rappresenta delle fascette metalliche a bassa impedenza, anziché il cavo di terra a sezione inferiore fornito separatamente o come parte del cavo motore.



Figura 3.14: Fascette per il collegamento a massa della schermatura [13].

Se non fosse rispettato l'accorgimento di Fig:[3.14], a causa dell'impedenza maggiore di questo cavo, le frequenze più alte associate ai disturbi di modo comune ricercerebbero un percorso ad impedenza minore. Tramite questa soluzione si è cercato di evitare che le correnti di disturbo seguissero altri **ground loop** in prossimità del bus di terra.

Le emissioni irradiate dai cavi di alimentazione affliggono la linea CAN-H e CAN-L in maniera minima poiché la schermatura ricopre completamente i cavi di segnale e di alimentazione. Inoltre, la schermatura previene l'accoppiamento **capacitivo** e **condotto** dei disturbi elettromagnetici tra i cavi di segnale stessi dato che, per l'applicazione, si trovano a dover essere instradati con un cavo multipolare.

### 3.6.2 Accorgimenti ulteriori di prevenzione EMI

Di seguito verranno descritte altre tecnologie che non sono fisicamente installate nel sistema, ma potrebbero portare beneficio dal punto di vista EMC.

<sup>3</sup>I sistemi civili TT o industriali TN prevedono che il conduttore neutro del carico sia collegato a terra nel medesimo punto del conduttore PE della cabina di distribuzione elettrica.

### Induttori di modo comune

Un altro metodo efficiente per la riduzione dei disturbi di modo comune è quello di attenuarli prima che possano raggiungere il percorso di terra. L'installazione di un *nucleo di ferrite di modo comune* sui cavi di uscita dall'inverter può ridurre l'ampiezza dei disturbi ad un livello che li rende relativamente non dannosi per le apparecchiature o i circuiti sensibili. Questo dispositivo, chiamato *induttanza di modo comune* è responsabile dell'innalzamento dell'impedenza serie per la sola corrente di modo comune, lasciando quasi invariata la corrente differenziale; in figura [3.15] è schematizzato il principio di funzionamento dell'induttore.

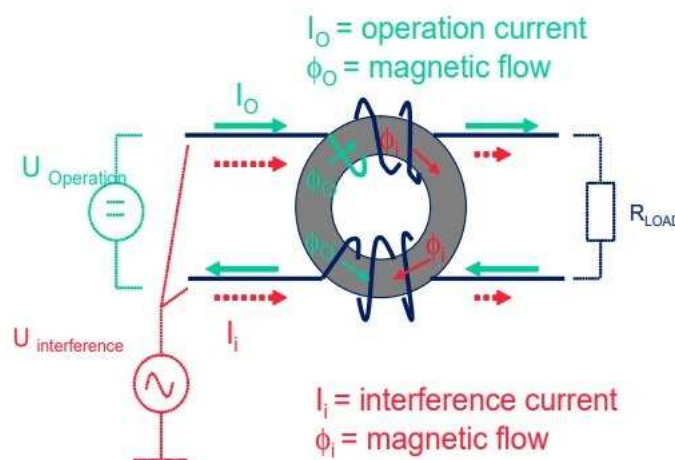


Figura 3.15: Principio di funzionamento induttore [15].

Nel caso reale, a causa della non perfetta uguaglianza tra gli avvolgimenti ne consegue la presenza di un flusso disperso ed un'impedenza di modo differenziale non nulla ma comunque dell'ordine di un centesimo dell'induttanza di modo comune.

### Diodi di flyback

Se l'applicazione prevede il collegamento delle interfacce di comunicazione CAN con carichi induttivi, come motori elettrici è fondamentale prevenire i fenomeni di richiusura delle correnti di ritorno di alimentazione sulla linea dati, come mostrato in figura [3.16]. Può accadere che a causa di danni meccanici o fenomeni di interferenza elettromagnetica, il circuito di terra del motore si apra, di conseguenza la corrente accumulata nel carico ricercherà il percorso a minor impedenza che è inevitabilmente rappresentato dalla linea dati. Quando ciò si verifica, è molto frequente che le interfacce

di comunicazione CAN si distruggano dato che non vi sono protezioni di default contro questi episodi. L'installazione di **diodi di flyback** sul motore si rende quindi necessaria; questi dispositivi devono essere posti in antiparallelo su ogni fase di alimentazione del motore ed il loro funzionamento è il seguente:

- Alimentazione carico ON: i diodi non conducono, funzionamento normale;
- Alimentazione carico OFF: i diodi si polarizzano ed entrando in conduzione permettono la richiusura della corrente dimodoché non si accumuli tensione di *flyback*.

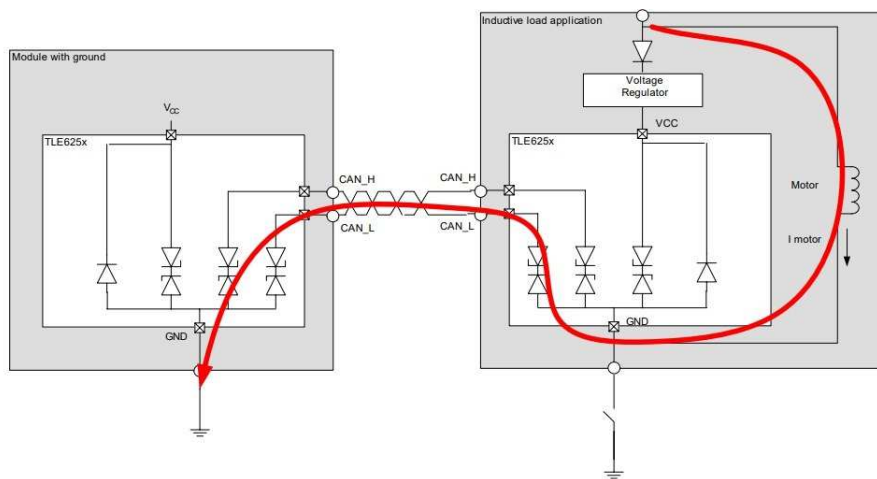


Figura 3.16: Tragitto della corrente con apertura del ground loop [15].

Nella figura [3.16] sono schematizzati rispettivamente: una centralina di comando collegata attraverso CANbus ad un carico induttivo (per esempio un motore elettrico). In rosso è segnato il percorso che compie la corrente di richiusura, nel caso di assenza dei diodi.



# Capitolo 4

## Analisi e risultati

### 4.1 Tipologia di misure

In questo capitolo sono descritte le modalità con le quali sono state effettuate le varie misure sul modulo di comunicazione CANbus, fisicamente presente in sede di test.

Dopo aver fornito una descrizione tecnica del sistema in esame ed aver evidenziando le soluzioni che consentono di attenuare l'effetto dei disturbi EM nei capitoli precedenti, è utile procedere con l'esecuzione di alcune misure che consentano di constatare l'efficacia delle soluzioni tecniche adottate allo scopo di garantire il corretto funzionamento della comunicazione CAN. Non avendo a disposizione oscilloscopi e analizzatori di spettro analogici adeguati per condurre in loco test di emissioni ed immunità sofisticati, si è optato per eseguire delle semplici misure elettriche, che consentono comunque di raggiungere il risultato preposto.

Si riportano le misure effettuate che verranno successivamente approfondite:

- corretta terminazione del CANbus;
- presenza di comunicazione con corto circuito tra CAN-L e CAN-GND;
- livelli di tensione corretti su CAN-H e CAN-L ;
- corretta messa a terra del CANbus.

## 4.2 Setup di misura

### 4.2.1 NI myDAQ

La scheda **NI myDAQ**, schematizzata in Fig.[4.1], è un dispositivo di acquisizione dati portatile alimentato da USB, che trova una forte applicazione in ambito accademico. Questo dispositivo impiega strumenti basati su software **NI LabVIEW** consentendo l'elaborazione e l'analisi dei segnali acquisiti.



Figura 4.1: Scheda NI myDAQ [16].

In particolare il dispositivo comprende:

- due canali analogici differenziali d'ingresso (*AI*) configurabili mediante due modalità: **general purpose** e **audio**. Nella prima i due canali presentano una frequenza di campionamento massima di acquisizione di **200 KS/s** con un range compreso tra  $[-10,+10]$  V. Nella seconda modalità la scheda offre la possibilità di analizzare segnali stereo in ingresso. I due canali condividono un unico convertitore analogico-digitale;
- due canali analogici differenziali di uscita (*AO*) anch'essi disponibili in due modalità: Uscita di tensione ed uscita audio. Le specifiche di tensione fornita e di rate disponibile sono analoghe a quelle dei canali d'ingresso *AI*. La differenza con i canali d'ingresso è che in questo caso ciascuno dei due è dotato di un proprio convertitore digitale-analogico;
- otto linee digitali (*DIO*), ciascuna configurabile come ingresso o uscita da software;
- tre uscite di alimentazione ( $+5V, +15V, -15V$ ). Le uscite di alimentazione  $\pm 15$  V vengono impiegate per alimentare dispositivi di potenza analogici come ad esempio gli amplificatori operazionali, mentre l'uscita a  $+5$  V viene utilizzata per componenti digitali come sensori e dispositivi logici;

- un multimetro digitale (*DMM*) che consente di eseguire le misure di tensione e di corrente (sia *DC* che *AC*), resistenza, continuità e caduta di potenziale sul diodo. Le misurazioni effettuate tramite il multimetro digitale potrebbero causare delle sovracorrenti dannose per la scheda myDAQ e per questo motivo è presente un fusibile.

Per utilizzare myDAQ come multimetro digitale è necessario abbinare il dispositivo al software **NI Elvismx**, questo permette di avere a disposizione un vero e proprio laboratorio di misura virtuale, pur con le dovute limitazioni.

In Fig.[4.2] si mostra il setup utilizzato nell'azienda Dragflow per l'esecuzione delle principali misure.

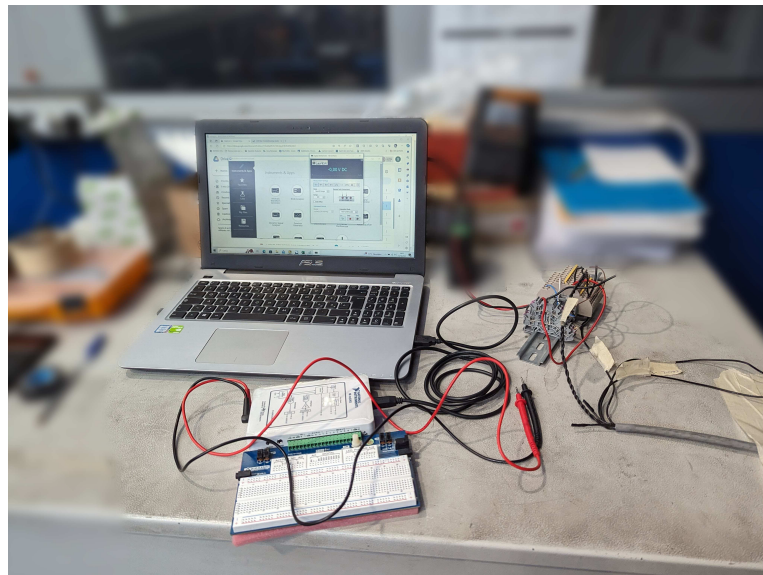


Figura 4.2: Disposizione del banco prova su interfaccia CANbus.

In particolare si può notare:

- un computer con i software di misura: NI Elvismx e LabView;
- una scheda NI myDAQ;
- due puntali collegati alla scheda.

In Fig.[4.3] è mostrato un altro strumento fondamentale per verificare il funzionamento della linea CAN in modo veloce ed intuitivo. Questo dispositivo deve essere collegato alla linea dati in modo da decodificare i

messaggi CAN, in questo modo si riesce a leggere direttamente da schermo la variazione di valori acquisiti dai sensori montati sul motore e valutarne la bontà.



Figura 4.3: Tester comunicazione CAN

Il dispositivo è in sostanza un pannello HMI<sup>1</sup> programmato ad hoc per lo specifico caso studiato nell'azienda.

## 4.3 Istruzioni di misura

In seguito sono elencate e spiegate quattro modalità di misure che sono state effettuate per verificare il corretto funzionamento del CANbus, presente nel sistema trovato in azienda.

### 4.3.1 Corretta terminazione del CANbus

La terminazione del bus viene utilizzata per far corrispondere la resistenza di un nodo alla resistenza della linea bus stessa. Se l'impedenza non corrisponde, il segnale trasmesso non sarà completamente assorbito del carico e verrà parzialmente riflesso nella linea di trasmissione.

Se le impedenze delle sorgenti, delle linee di trasmissione e del carico sono

---

<sup>1</sup>L'acronimo HMI indica l'insieme delle tecnologie hardware e software relative alla semplificazione dell'interazione tra l'uomo e la macchina.

uguali, le riflessioni vengono evitate. Questo test misura la resistenza totale delle due linee dati CAN e delle resistenze di terminazione collegate.

Per eseguire il test è necessario procedere come segue:

1. spegnere le tensioni di alimentazione di tutti i nodi CAN collegati;
2. misurare la resistenza tra le linee CAN-H e CAN-L ad un'estremità della rete: punto (1) in Fig.[4.4].

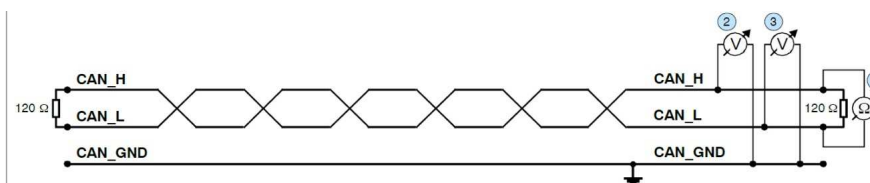


Figura 4.4: Schema CANbus semplificato [17].

In figura [4.4] sono riportati, in maniera semplificata, i collegamenti tra due nodi CANbus.

Risultato atteso: valore compreso tra **50 Ω** e **70 Ω**.

Possibili cause di errore:

- Se il valore misurato è inferiore a **50 Ω**, assicurarsi che:
  - non ci sia cortocircuito tra CAN-H e CAN-L;
  - non siano collegate più di due resistenze ai terminali;
  - i ricetrasmittitori dei singoli nodi non sono difettosi.
- Se il valore misurato è superiore a **70 Ω**, assicurarsi:
  - tutte le linee CAN-H e CAN-L sono collegate correttamente;
  - due resistenze di terminazione da 120 Ω ciascuna sono collegate alla rete CAN, una per ogni estremità.

### 4.3.2 Cortocircuito tra CAN-GND e CAN-L

Un CANbus può essere ancora in grado di trasmettere dati anche se CAN-GND e CAN-L sono in cortocircuito, ad esempio in caso di guasto. Tuttavia questo solitamente causa un forte aumento del tasso di errore nei dati.

In Fig.[4.5] è mostrato come provocare un cortocircuito intenzionale tra la linea bassa e il riferimento di massa del CANbus.

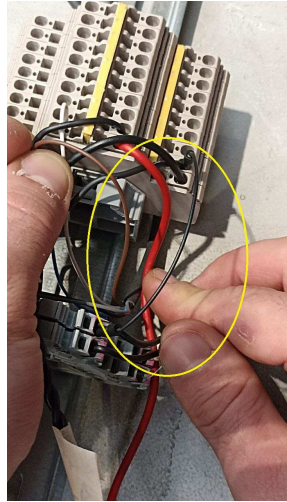


Figura 4.5: Cortocircuito creato con un cavo

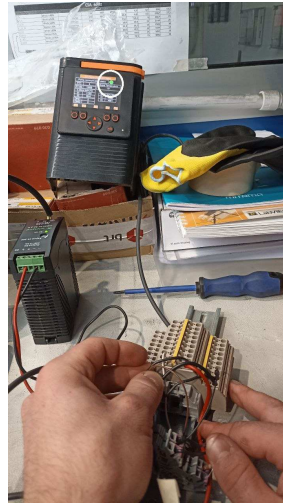


Figura 4.6: Cerchiato in bianco led di corretta comunicazione CAN

Come si può notare in Fig.[4.6], il test fornisce un esito positivo, infatti è verificata la comunicazione anche in questa circostanza, ovvero in caso di primo guasto verso massa.

### 4.3.3 Livelli di tensione corretti su CAN-H e CAN-L

Ogni nodo ha un ricetrasmittitore CAN che genera segnali differenziali sulle linee dati. Quando la comunicazione di rete è inattiva, le tensioni di CAN-H e CAN-L sono comprese tra 2,5 V e CAN-GND. I ricetrasmittitori difettosi possono modificare queste tensioni di quiescenza e interrompere le comunicazioni di rete.

Per verificare la presenza di ricetrasmittitori difettosi procedere come segue:

1. attivare tutte le tensioni di alimentazione;
2. terminare tutte le comunicazioni di rete;
3. misurare la tensione continua tra CAN-H e CAN-GND e tra CAN-L e GND, punti (2), (3) di figura [4.4].

Risultato atteso: la tensione misurata dev'essere compresa tra **2.00 V** e **3.00 V**

Possibili cause di errore:

Se la tensione è inferiore a **2.00 V** o superiore a **3.00 V**, è possibile che uno o più nodi abbiano ricetrasmittitori difettosi. Se il risultato è inferiore a **2.00 V**, controllare il collegamento delle linee CAN-H e CAN-L.

Questa misura si rivela essere fondamentale per il corretto funzionamento della comunicazione CAN, pertanto è ottimale eseguirla sia con linea dati a riposo sia in condizioni di trasmissione. In particolare in un sistema inverter-motore in cui le linee CAN corrono vicine ai cavi di alimentazione è opportuno ripetere la misura in presenza di rampe di accelerazione e decelerazione. Queste ultime sono difatti le principali cause dell'introduzione dei disturbi EM nel sistema.

#### 4.3.4 Corretta messa a terra del CANbus

La linea CAN-GND della rete deve essere collegata al potenziale di terra di protezione PE in un solo punto, come ben evidenziato in Fig.[4.7].

Questo test indica se la linea CAN-GND è collegata a terra in uno o più punti.

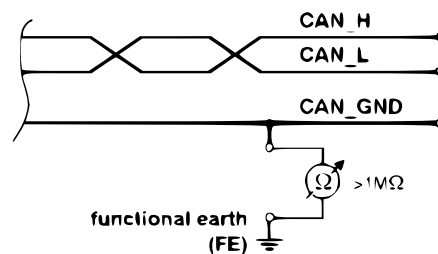


Figura 4.7: Schema della misurazione della messa a terra [17].

Per eseguire il test procedere come segue:

1. scollegare la linea CAN-GND dal potenziale di terra PE;
2. misurare la resistenza tra CAN-GND e potenziale di terra, attenendosi alla Fig.[4.7].

Risultato atteso:

La resistenza misurata deve essere  $>1M\Omega$ . Se più piccola cercare un'ulte-

riore messa a terra dei cavi CAN-GND

## 4.4 Risultati ottenuti

Per rilevare le misure di tensione è stato creato un programma di LabVIEW che, attraverso l'interfaccia myDAQ, esegua misure ripetute con una frequenza massima di acquisizione pari a 1 kHz e risoluzione pari a 0.01 V (nel range di 20.00 V). La Fig.[4.8] mostra il block diagram del programma realizzato.

Per le misure di resistenza, invece, è stata utilizzata la scheda myDAQ, che abbinata al programma NI Elvismx può essere utilizzata come un multimetro.

Le prove sono state eseguite mediante il seguente ordine:

1. misure di Resistenza quali: (4.1), (4.1);
2. verifica in presenza di cortocircuito: (4.1);
3. misure di Tensione quali: (4.1).

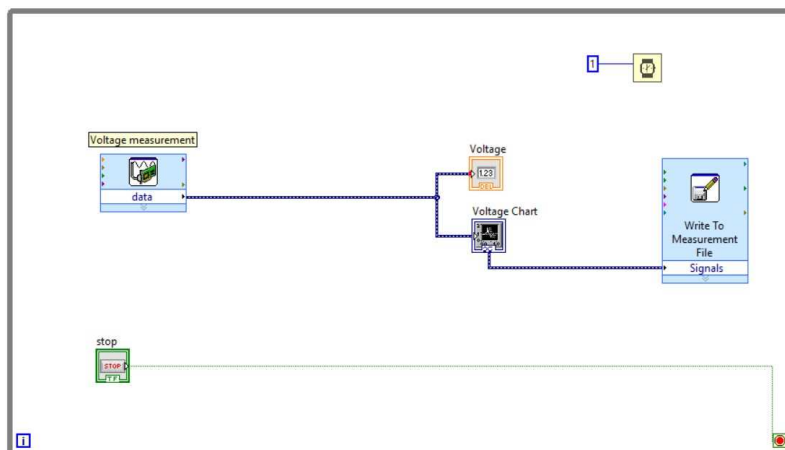


Figura 4.8: Block diagram di LabVIEW per acquisizione tensione

Il block diagram di LabVIEW di figura [4.8] è così composto:

- il blocco *Voltage measurement* permette di interfacciare la scheda myDAQ con LabVIEW e di settarne i parametri;



- due blocchi di visualizzazione di cui: uno numerico ed uno grafico. Tramite questi è possibile visualizzare nel front panel i valori delle grandezze acquisite;
- il blocco *Write to measurement File* permette di salvare i dati acquisiti all'interno di un foglio di calcolo;
- il blocco *Wait* e la relativa costante indicano ogni quanto vengono iterate le misure;
- un ciclo while con relativa condizione di stop che permette l'iterazione del programma.

#### 4.4.1 Misure di resistenza

Di seguito verranno riportati i valori ottenuti dai test, rispettivamente (4.3.1)(4.3.4), descritti precedente in questo capitolo.

#### Resistenza tra CAN-H e CAN-L

Nella figura [4.9] è raffigurato il valore di resistenza misurato tra le linee dati del CANbus.

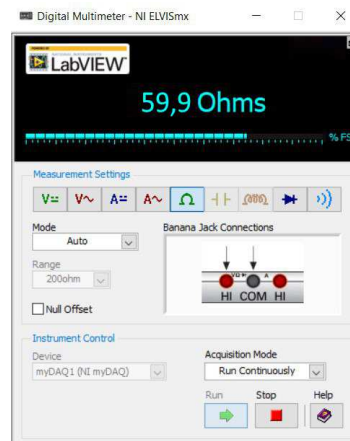


Figura 4.9: Resistenza linee dati CAN

Il valore ottenuto, come descritto nel paragrafo (4.3.1), rientra nel range ottimale atteso. Si conclude quindi che la terminazione del bus dati è corretta.

## Resistenza linea di ground CAN

Non è stato possibile verificare la corretta messa a terra del CANbus poiché il modulo di comunicazione CAN per funzionare sul banco prova, doveva essere alimentato da un trasformatore AC/DC. La linea di terra quindi era isolata galvanicamente dalla linea CAN-GND perciò il test rilevava una non continuità.

### 4.4.2 Misure di tensione

Le tabelle (4.1)(4.2) presentano una serie di misure di tensione rilevate su una linea CANbus in due diverse condizioni operative: con inverter spento e in funzione. Nel primo caso, i valori rimangono costanti attorno a 2,59 V, mostrando una variazione minima che indica un'alta stabilità della linea in assenza di perturbazioni indotte dall'inverter. Questa costanza è essenziale per assicurare la trasmissione affidabile dei dati. Contrariamente, l'attivazione dell'inverter causa una fase iniziale caratterizzata da una maggiore instabilità, evidenziata da un abbassamento dei valori di tensione fino a 2,22 V, seguita da un successivo riallineamento ai livelli di tensione precedenti. Queste osservazioni suggeriscono che l'inverter, durante la sua attivazione, introduce delle perturbazioni che possono influenzare la qualità della trasmissione sulla linea CANbus. Queste variazioni richiedono una valutazione dettagliata per comprendere gli effetti dei disturbi elettromagnetici sul CANbus, in modo tale da poter sviluppare eventuali accorgimenti al fine di migliorare la stabilità dei segnali, provenienti dai sensori, durante tutte le fasi operative.

Istante di acquisizione [s]	Valore [V]
0	2,59
1,50	2,59
3,49	2,59
5,00	2,58
6,99	2,58
8,50	2,59
10,49	2,59
12,00	2,59
13,99	2,59
15,5	2,59
17,49	2,58
19,00	2,59
20,99	2,58
22,49	2,58
24,49	2,59
26,00	2,59
27,99	2,58
29,50	2,58
31,49	2,59
33,00	2,58
34,99	2,58
36,50	2,59
38,49	2,59
39,99	2,59
41,99	2,59
43,49	2,58

Tabella 4.1: Misure con inverter spento

Istante di acquisizione [s]	Valore [V]
0	2,22
1,50	2,15
3,49	2,47
5,00	2,34
6,99	2,49
8,50	2,59
10,49	2,59
12,00	2,59
13,99	2,59
15,50	2,59
17,49	2,58
19,00	2,59
20,99	2,58
22,49	2,58
24,49	2,59
26,00	2,59
27,99	2,58
29,50	2,58
31,49	2,59
32,99	2,58
34,99	2,58
36,49	2,59
38,49	2,59
39,99	2,59
41,99	2,59
43,49	2,58

Tabella 4.2: Misure con inverter in funzione



# Conclusioni

I risultati ottenuti dalle misurazioni, mostrano che il CANbus funziona correttamente dal punto di vista EMC.

Nello specifico, si è osservato che, durante le fasi di comunicazione a riposo, la tensione media rimaneva stabile circa a  $2.60 \pm 0.01V$ . Questo risultato è in linea con le aspettative, confermando perciò la robustezza del sistema nella fase di inattività, dove il protocollo CAN dimostra la sua affidabilità e coerenza. Durante i periodi di accelerazione e decelerazione del motore della pompa, l'inverter causa fluttuazione temporanea della tensione sulla linea CANbus, che variava tra 2.00 V e 3.00 V. Ciononostante si è riscontrato che dopo un breve periodo il sistema è in grado di stabilizzare la tensione al valore nominale. Questa proprietà rigenerativa è dovuta all'utilizzo di cavi schermati che consentono di mitigare gli effetti EMI, poiché quest'ultimi causerebbero delle fluttuazioni di tensione sulle linee CAN-H e CAN-L. L'uso della schermatura diventa perciò essenziale in ambienti con alta presenza di disturbi.

L'utilizzo di cavi schermati non è l'unica soluzione ai problemi causati da fenomeni EMI, si può agire anche sui seguenti aspetti progettuali e non:

- grounding;
- layout;
- alimentatori;
- accorgimenti software;
- filtri EMI.

Poiché queste soluzioni non sono applicate al sistema in esame, non sono state studiate a fondo. Per ulteriori approfondimenti si rimanda a testi dedicati.



# Bibliografia

- [1] A. Sona, *INTERFERENZE ELETTROMAGNETICHE, Effetti indesiderati e soluzioni in ambito EMC*. Lulu, 2016.
- [2] S. Buso, *Introduzione alle applicazioni industriali di microcontrollori e DSP*. Società editrice Esculapio, 2018.
- [3] M. Bertocco and A. Sona, *Introduzione alle MISURE ELETTRONICHE*. Lulu, 2010.
- [4] W. Voss, “Can bus and sae j1939 bus voltage,” 2019.
- [5] esd electronics gmbh, “Can bus troubleshooting guide.”
- [6] T. Vikas Kumar, “Top design questions about isolated can bus design.”
- [7] N. Fima, “Trasmettitori di pressione.”
- [8] Thermik, “Type series ptc thermistors,” 2019.
- [9] Miotti, “Sonda 3 fili con sensore esposto e doppia capsula in teflon termoretraibile.”
- [10] Flamar, “Team servo mobile bosch.”
- [11] M. Electronic, “Moduli di controllo serie cc16wp.”
- [12] IFM, “sensore d’inclinazione jn2201.”
- [13] R. Automation, “Regole generali di cablaggio e messa a terra degli inverter a modulazione di ampiezza degli impulsi (pwm),” 2010.
- [14] C. UNEL, “Cei unel 36761-2009/04,cavi coassiali per la distribuzione di segnali,” 2009.
- [15] Infineon, “High speed can transceivers application note.”

[16] N. Instruments, “Ni mydaq user guide.”

[17] esd electronics gmbh, “Can bus troubleshooting guide.”



# Elenco delle tabelle

2.1	Speed rate in rapporto alla lunghezza della linea . . . . .	22
4.1	Misure con inverter spento . . . . .	55
4.2	Misure con inverter in funzione . . . . .	55



# Elenco delle figure

1.1	Generico circuito sorgente o vittima di interferenza EM [1].	4
1.2	Rappresentazione campo elettrico $E_c$ (coulombiano) [1]. . .	7
1.3	Rappresentazione grafica della Legge di Laplace [1]. . . . .	8
1.4	Legge di Biot-Savart [1]. . . . .	9
1.5	Rappresentazione grafica del campo elettromagnetico [1]. .	10
1.6	Elementi parassiti di un generico tratto circuitale [1]. . . .	12
1.7	Andamento in frequenza del modulo di $Z_s$ in dB [1]. . . . .	14
1.8	Tipi di accoppiamento tra sorgente ed elemento vittima [1].	15
1.9	Esempi di antenne elementari [1]. . . . .	16
2.1	Priorità messaggi CANbus [2]. . . . .	20
2.2	Livelli CANbus [4]. . . . .	21
2.3	Esempio di linea CANbus [5]. . . . .	21
2.4	Composizione di un messaggio CANbus [2]. . . . .	23
2.5	Forma d'onda corrente digitale in funzione del tipo di carico [1].	26
2.6	Scomposizione di una coppia di correnti in MD e MC [1]. .	28
2.7	Percorsi della corrente di modo comune [13]. . . . .	28
3.1	Diagramma a blocchi del sistema . . . . .	31
3.2	Targhetta motore . . . . .	32
3.3	Foto motore su banco prova . . . . .	32
3.4	Targhetta inverter . . . . .	33
3.5	Foto quadro inverter . . . . .	33
3.6	Modulo CC16WP MRS Electronic [11]. . . . .	34
3.7	Sezione del cavo [10]. . . . .	35
3.8	Sensore PTC [8]. . . . .	36
3.9	Sensore PT100 a 3 fili [9]. . . . .	37
3.10	Inclinometro IFM JN2201 [12]. . . . .	38
3.11	Pressostato Nuova Fima STLV [7]. . . . .	39
3.12	Andamento in frequenza di $Z_T$ [1]. . . . .	41
3.13	Classi di schermatura secondo normativa CEI [14]. . . . .	41

---

3.14	Fascette per il collegamento a massa della schermatura [13].	42
3.15	Principio di funzionamento induttore [15]. . . . .	43
3.16	Tragitto della corrente con apertura del ground loop [15]. .	44
4.1	Scheda NI myDAQ [16]. . . . .	46
4.2	Disposizione del banco prova su interfaccia CANbus. . . .	47
4.3	Tester comunicazione CAN . . . . .	48
4.4	Schema CANbus semplificato [17]. . . . .	49
4.5	Cortocircuito creato con un cavo . . . . .	50
4.6	Cerchiato in bianco led di corretta comunicazione CAN . .	50
4.7	Schema della misurazione della messa a terra [17]. . . . .	51
4.8	Block diagram di LabVIEW per acquisizione tensione . . .	52
4.9	Resistenza linee dati CAN . . . . .	53