



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA  
TOR VERGATA**

**FACOLTÀ DI INGEGNERIA**

**CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA DELL'AUTOMAZIONE**

A.A. 2020/2021

**Tesi di Laurea**

---

Sviluppo di algoritmi di controllo delle correnti nelle bobine poloidali di macchine per la fusione Tokamak, con riguardo al design sistemico per la cooperazione tra sistemi embedded per l'attuazione, misurazione e centrali di controllo.

---

**RELATORE**

Daniele Carnevale

**CANDIDATO**

Emanuele Alfano

**CORRELATORI**

Marco Passeri

*Dedico questa tesi ai miei cari nonni.*

*Grazie per aver sempre creduto in me.*

# Indice

<b>Ringraziamenti</b>	<b>1</b>
<b>1 Elementi Costitutivi</b>	<b>2</b>
1.1 Trasformatore - Modello di Tokamak . . . . .	2
1.1.1 Modellazione Fisica . . . . .	2
1.1.2 Funzione di Trasferimento . . . . .	2
1.2 Sensore di Corrente . . . . .	3
1.2.1 Regime di funzionamento . . . . .	3
1.2.2 Funzionamento Interno . . . . .	4
1.2.3 Connessione elettrica . . . . .	6
1.2.4 Misura . . . . .	6
1.3 Driver di Corrente - IBT-2 . . . . .	8
1.3.1 Connessione di Controllo . . . . .	9
1.3.2 Benchmark Driver . . . . .	10
<b>2 Architettura di Sistema</b>	<b>12</b>
2.1 Architettura ad alto livello . . . . .	12
2.2 Protocollo di Comunicazione - EMP . . . . .	12
2.2.1 Metodo di codifica . . . . .	12
2.2.2 Struttura del codice . . . . .	12

2.2.3	Benchmark . . . . .	12
2.3	Online Sampling . . . . .	12
2.3.1	Interconnessione Arduino $\Leftrightarrow$ Companion . . . . .	12
2.3.2	Storage su file delle informazioni . . . . .	12
2.4	Post Elaborazione con Matlab . . . . .	12
2.4.1	Conversioni Dati . . . . .	12
2.4.2	Creazione dei grafici e Filtraggio . . . . .	12
<b>3</b>	<b>Modello teorico di Controllo</b>	<b>13</b>
3.1	Controllo a Errore Nullo . . . . .	13
3.2	Simulazione Qualitativa su Simulink . . . . .	13
<b>4</b>	<b>Sviluppo Controllo reale</b>	<b>14</b>
4.1	Codifica del controllore . . . . .	14
4.2	Tuning delle costanti . . . . .	14
4.3	Esperimenti . . . . .	14
<b>5</b>	<b>Conclusioni e sviluppi futuri</b>	<b>15</b>
<b>Appendice A</b>	<b>- Codice Arduino</b>	<b>16</b>
5.1	Set-up Registri . . . . .	16
5.2	Generatore di Segnale . . . . .	18
5.2.1	Segnali Base . . . . .	18
5.2.2	Segnali Composti . . . . .	19
5.3	Codici Controllore . . . . .	20
<b>Appendice B</b>	<b>- Codice EMP</b>	<b>21</b>
<b>Appendice C</b>	<b>- Matlab Post Elaboration</b>	<b>22</b>

<b>Elenco delle figure</b>	<b>23</b>
----------------------------	-----------

# Ringraziamenti

Corpo dei ringraziamenti

# Capitolo 1

## Elementi Costitutivi

*Se lo si desidera, utilizzare questo spazio per inserire un breve riassunto di ciò che verrà detto in questo capitolo. Inserire solo i punti salienti.*

### 1.1 Trasformatore - Modello di Tokamak

La tesi va scritta usando la terza persona, per quanto possibile, tranne casi veramente eccezionali.

In inglese è piuttosto standard usare la prima persona (plurale) in testi tecnici. In italiano no.

#### 1.1.1 Modellazione Fisica

#### 1.1.2 Funzione di Trasferimento

## 1.2 Sensore di Corrente

Benché per gli obiettivi di controllo la lettura della corrente sul primario non è indispensabile, si è però preferito poter misurare cosa stia succedendo all'interno del sistema.

### 1.2.1 Regime di funzionamento

Per allo scopo di misurare la corrente è stato messo in serie al primario il sensore di Corrente **ACS770**

Le scelte che hanno portato alla sua scelta sono:

Bandwidth:	120 kHz
Output rise time :	4.1 $\mu s$
Ultralow power loss:	100 $\mu\Omega$ Resistenza Interna
Single supply operation	4.5 to 5.5 V
Extremely stable output offset voltage	

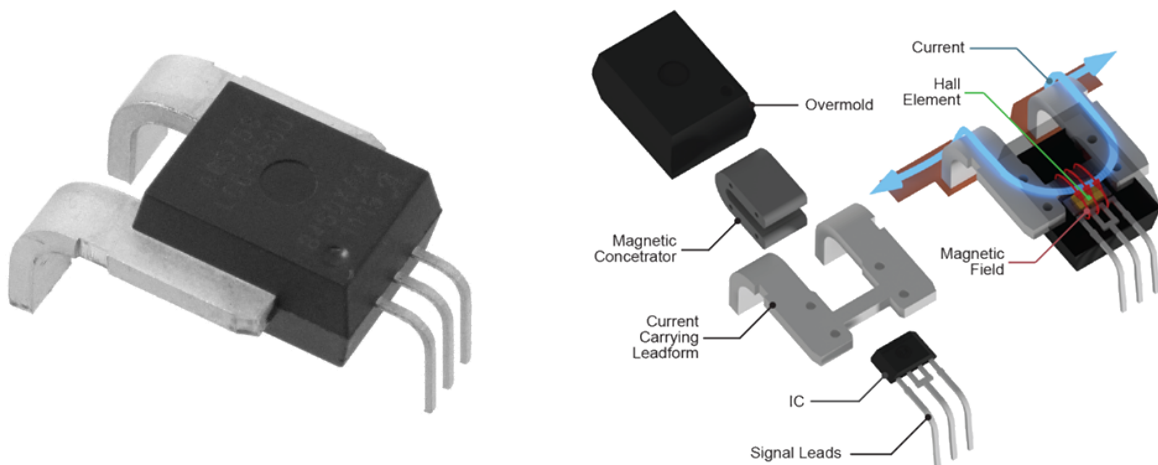


Figura 1.1: Sensore di Corrente

Delle tante varianti presenti, si è scelto di usare la **ACS770**, le cui caratteristiche chiave di questa variante sono:

Primary Sampled Current:	$\pm 100$ A
Sensitivity Sens (Typ.)	20(mV/A)
Current Directionality	Bidirectional
$T_{OP}$	-40 to 150 ( $^{\circ}C$ )

Queste caratteristiche lo rendono adatto per misurare i nostri esperimenti comprendo tutti i possibili valori di corrente misurabili.



Essendo però il principio di funzionamento basato su un sensore a effetto Hall, ovvero una misura diretta del campo magnetico indotto, è importante tenere distante il sensore dal trasformatore che nei suoi momenti di massimo flusso, genera ovviamente un campo magnetico non indifferente.

### 1.2.2 Funzionamento Interno

Tra le caratteristiche chiave dell'**ACS770**, troviamo il disaccoppiamento fisico tra la corrente da misurare e il circuito di misura, come è possibile vedere nel suo schema a blocchi:

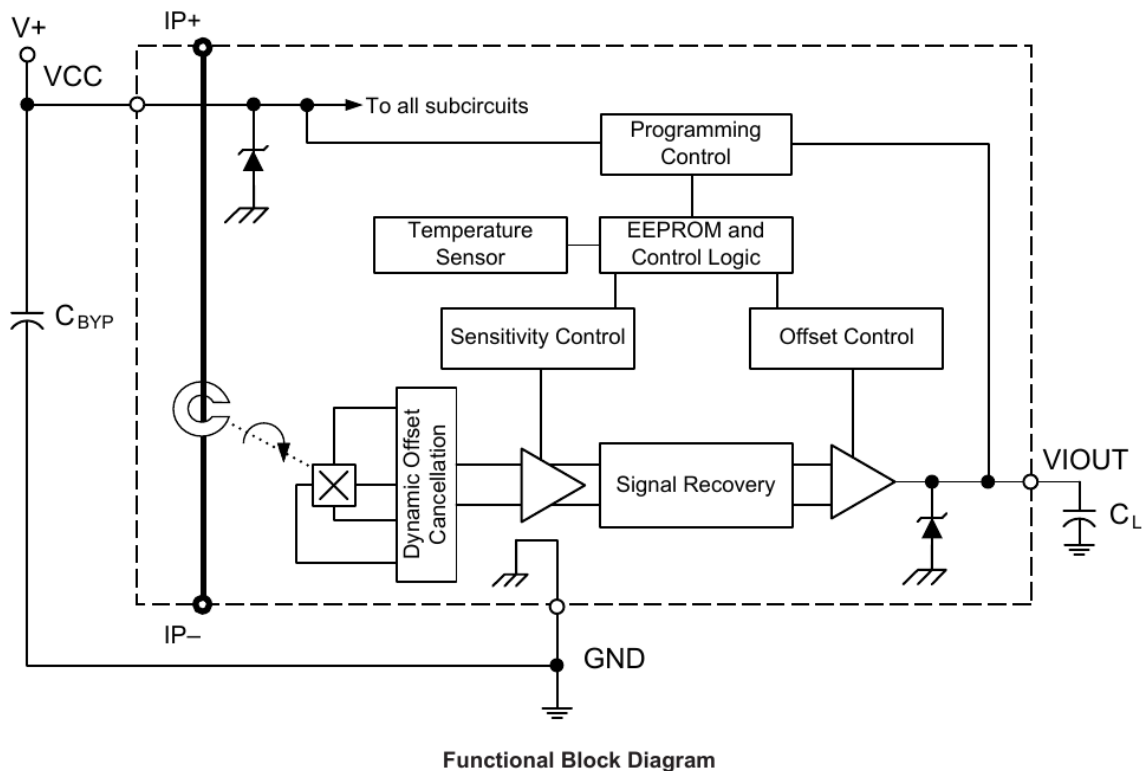


Figura 1.2: Schema a Blocchi

Questa caratteristica chiave, garantisce la salvaguardia del circuito logico a valle, dai possibili eventi catastrofici a monte.

Esso è inoltre fornito di sensori di temperatura e sistemi di "Signal Recovery" che permettono in Hardware di compensare derivate termiche e *Non-Linearità*, ottenendo un output assimilabile a un

segnale lineare:

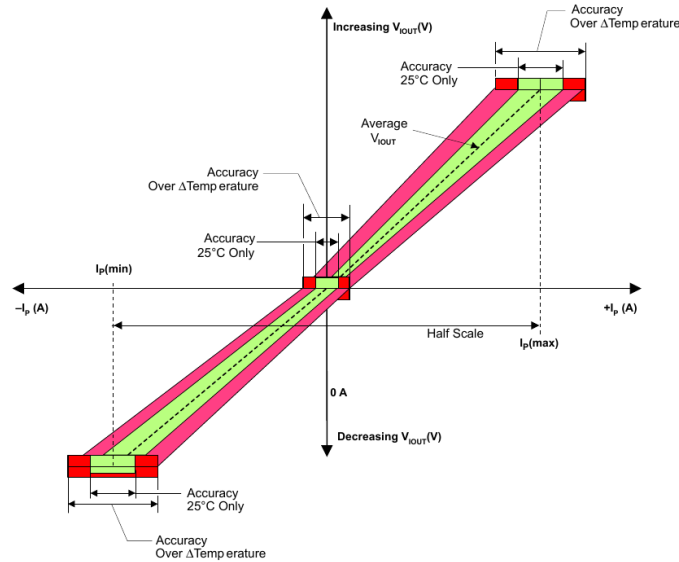


Figura 1.3: Sensibilità

Esso ovviamente varia in base alla temperatura, e l'errore è tanto più marcato tanto maggiore è la corrente da misurare, ma leggendo dal datasheet abbiamo che questo errore, che dipende sia dalle temperature di esercizio dell'esperimento, non è mai, neanche negli esperimenti più sfortunati, superiore al  $\pm 2\%$ .

Anzi, alle temperature  $\approx 25^\circ$ , si mantiene contenuto tra  $\pm 0.5\%$ .

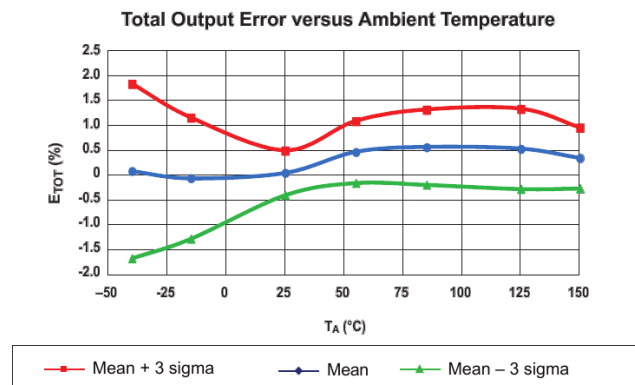


Figura 1.4: Temperatura/NonLinearità

### 1.2.3 Connessione elettrica

La connessione del sensore è particolarmente semplice, richiedendo esternamente solo un'alimentazione stabilizzata e portando subito in uscita la misura.

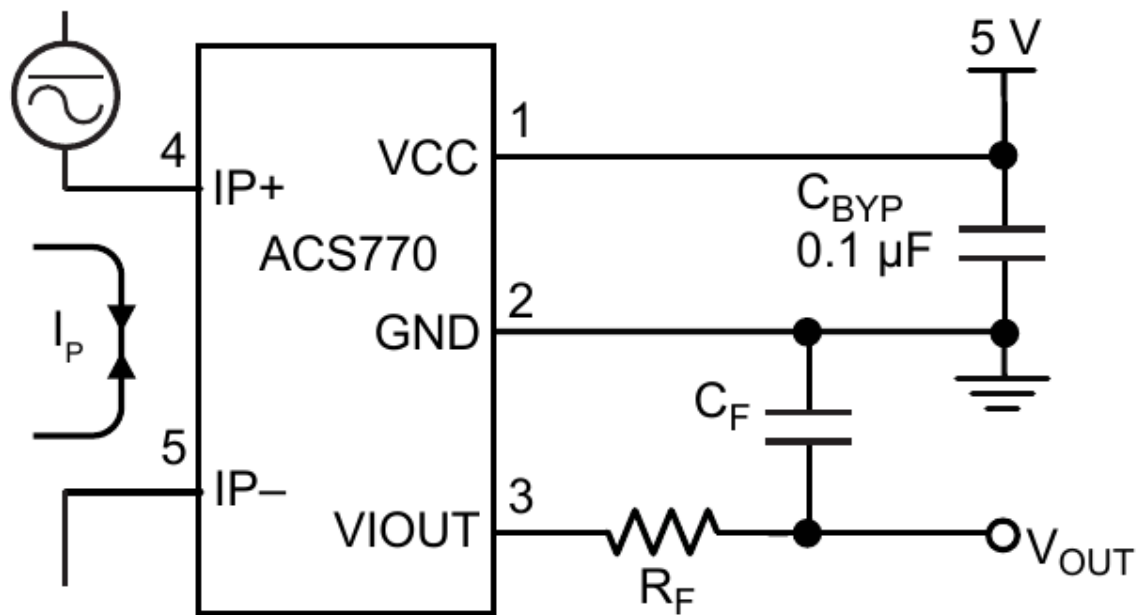


Figura 1.5: Schema di Collegamento

Rispetto allo schema proposto dal datasheet, però, si è anche deciso di omettere il filtro passa-basso sulla **VIOOUT**, questa scelta è stata presa per minimizzare il più possibile ritardi di misura della corrente istantanea, poiché le dinamiche del sistema sul secondario, come visto, sono di tipo derivativo, e quindi estremamente rapide.

### 1.2.4 Misura

La misura della corrente viene riportata sotto forma di tensione, la quale varia in base alla **Sensibilità** del modello in uso. Avendo noi il **ACS770**, il datasheet riporta:

Primary Sampled Current:	$\pm 100 \text{ A}$
Sensitivity Sens (Typ.)	$20(\text{mV/A})$
Current Directionality	Bidirectional

Ciò implica che la corrente misurata, è calcolabile come:

$$I_{read} = \frac{V_{Read}[\text{V}]}{V_{sense}[\text{V/A}]}$$

**Offset** Essendo però il device ad alimentazione singola (0–5V), ma la corrente misurabile Bidirezionale, sorge la necessità di spostare gli 0A a una tensione superiore agli 0V.

Il datasheet riporta che  $V_{offset} = \frac{V_{cc}}{2} \approx 2.5\text{V}$ . Da cui deriva che la vera misura di corrente è:

$$I_{read} = \frac{V_{Read} - V_{offset} [\text{V}]}{V_{sense} [\frac{\text{V}}{\text{A}}]}$$

Al fine di poter misurare l'offset effettivo, durante il set-up viene eseguito a esperimento fermo una misura dell'offset attuale, usando la [Macro per calcolo Offset](#).

Il risultato della computazione, oltre ad essere usato nel controllo è inviato al computer per la post elaborazione dei dati nei grafici.

**Sensibilità** Usando nell'esperimento un ADC a 10Bit con tensione di riferimento a 5V, abbiamo che la massima sensibilità del  $\mu$ Controllore, ovvero il suo bit meno significativo è pari a:

$$V_{step} = \frac{V_{cc}}{2^{10}-1} = 4,887\text{mV}.$$

Portando questo valore nella corrente otteniamo che la Sensibilità in corrente del  $\mu$ Controllore è pari a:

$$I_{step} = \frac{V_{step}}{V_{sense}} = 244,379\text{mA}$$

Il che rende la misura buona per osservare cosa stia accadendo, ma sicuramente non sufficientemente densa da poterla usare come parametro ingresso di controllo.

1.3 Driver di Corrente - IBT-2

Per l’attuazione del controllo di corrente nella bobina primaria del trasformatore, è stato usato il driver di corrente **IBT-2** .

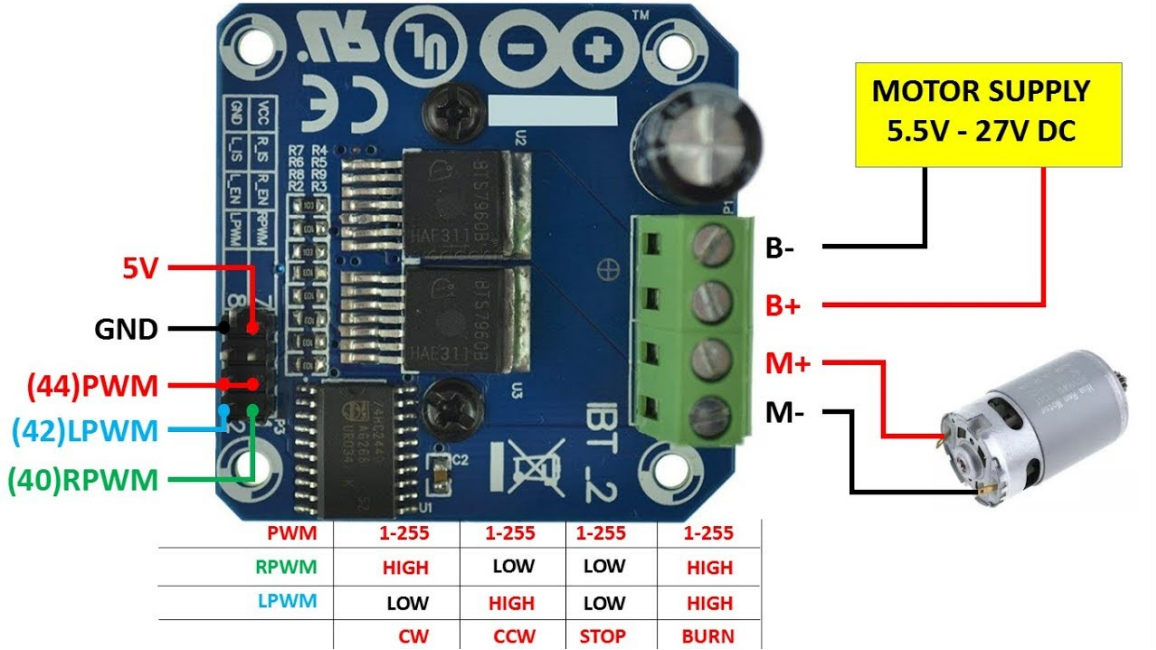


Figura 1.6: IBT-2 TopView.

Esso non è un comune Ponte-H integrato, per poter gestire potenze superiori è stato costruito usando 2 Half-Bridge collegati insieme mediante una opportuna logica per ricreare un normale Ponte-H. Questa scheda in particolare ha prestazioni interessanti per gli scopi di questa tesi, i principali sono elencati di seguito:

Power Input Voltage:	6 – 27 V
Peak current:	43 A
Massima Frequenza di PWM:	25 kHz
Protezione Sovra Tensioni	
Disaccoppiamento Ingresso di Potenza/Logica di controllo	

Di particolare interesse per l’esperimento è proprio la corrente di picco gestibile: avendo le dinamiche del sistema tempi inferiori ai 5 secondi, poter reggere correnti di picco così elevate rende la scheda perfetta per i nostri scopi.

### 1.3.1 Connessione di Controllo

Il driver permette 2 modalità di funzionamento:

**Doppio PWM** Modalità operativa che richiede l'uso di 2 PWM

Ciascun PWM controlla uno dei 2 Half-Bridge, e per evitare di bruciare i driver devono essere controllati singolarmente, il vantaggio di questa configurazione è la possibilità di usare 2 frequenze di controllo diverse.

**Singolo PWM** Modalità operativa classica di un normale Ponte-H

In questa modalità, la porta nand presente sulla scheda attua la logica di controllo opportuna per governare i 2 Half-Brige come fossero un normale Ponte-H.

Per il nostro esperimento si è scelto di usare il collegamento Singolo PWM così da evitare spiacevoli sorprese e avere il PWM di controllo sempre sincronizzato.

### 1.3.2 Benchmark Driver

Il driver sulla carta à buone prestazioni, ma non sono descritte le sue *Non-Linearità*, per farle risaltare si sono effettuati 2 esperimenti usando differenti input di controllo:

#### 1. Onda Triangolare Periodica

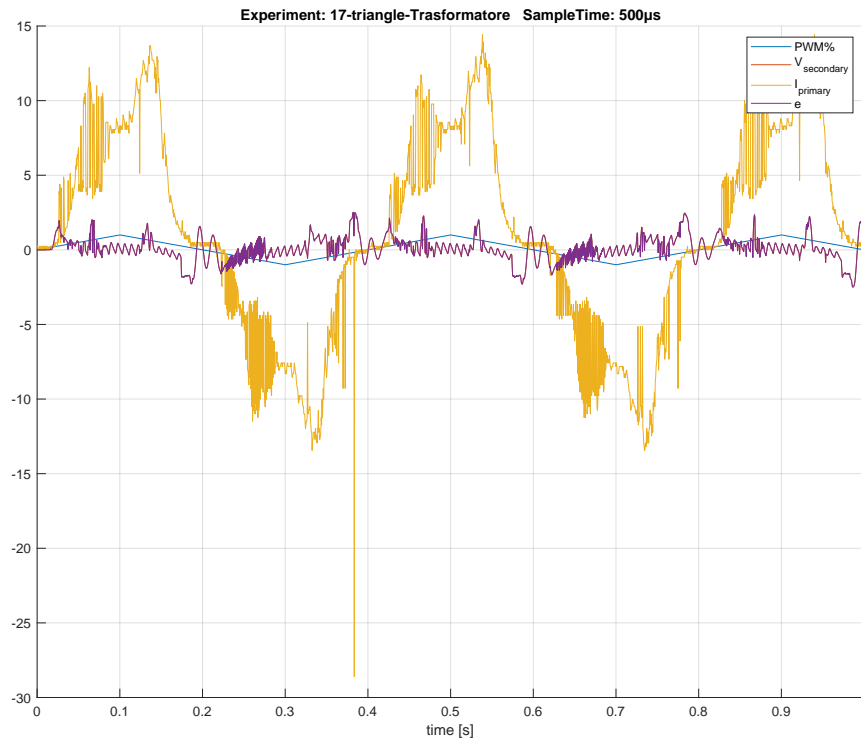


Figura 1.7: Onda Triangolare

**Dead-Zone Inferiore** L'onda triangolare si presta bene per far risaltare la problematica della Dead-Zone Inferiore, infatti in tutti gli intorni in cui il segnale passa per 0, è possibile vedere come la corrente non vari minimamente, è però possibile notare che i 2 lati non sono simmetrici tra di loro, questo è facilmente spiegabile dal fatto che il primo ha una condizione iniziale  $\neq 0$  e di fatto stiamo ancora osservando l'esaurimento del transitorio, la soglia di Dead-Zone Inferiore è quindi calcolata vedendo il primo valore di PWM per cui il sistema risponde a destra degli 0.

## 2. Onda Trapezoidale Periodica

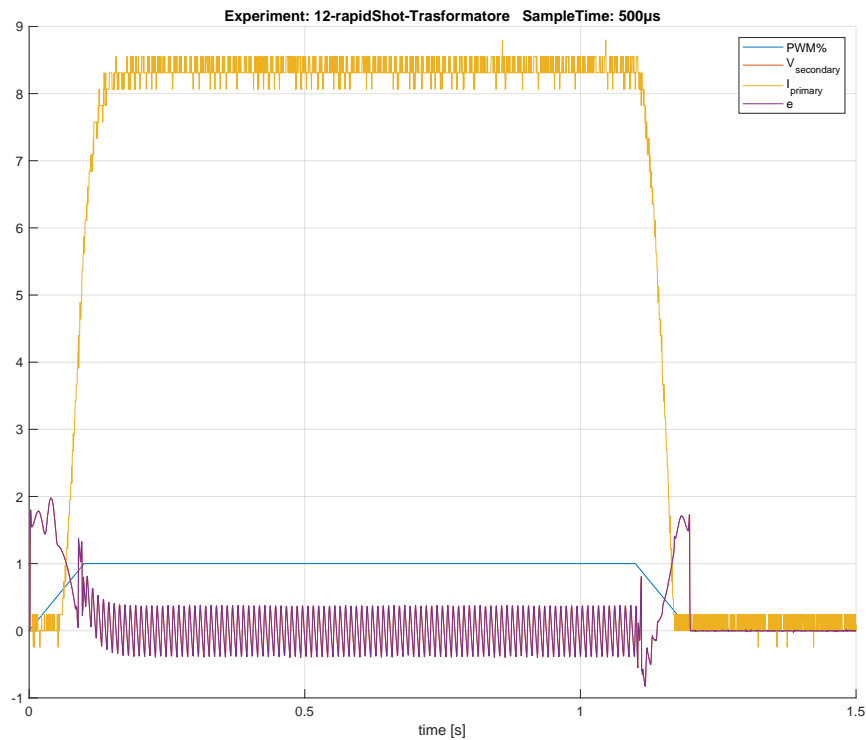


Figura 1.8: Onda Trapezoidale

**Dead-Zone Superiore** Con questo secondo segnale, si vuole mettere in evidenza il ritardo durante la discesa della rampa, pari a circa 20ms (*guarda 1.1s*), questo ritardo è in realtà dovuto da una seconda Dead-Zone presente però ai Duty-Cycle alti del PWM.

**Disturbo 50Hz** Essendo in oltre presente un segnale costante per un pò, quando i transistori terminano risulta evidente la presenza della 50hz nel segnale della corrente proveniente dall'alimentatore, questo disturbo è però dovuto alla fonte della corrente, ovvero la 220Vac del laboratorio, il medesimo esperimento realizzato con una batteria non ha disturbi così marcati.



## Capitolo 2

# Architettura di Sistema

*Se lo si desidera, utilizzare questo spazio per inserire un breve riassunto di ciò che verrà detto in questo capitolo. Inserire solo i punti salienti.*

In cosa consiste la catena di acquisizione

### 2.1 Architettura ad alto livello

### 2.2 Protocollo di Comunicazione - EMP

#### 2.2.1 Metodo di codifica

#### 2.2.2 Struttura del codice

#### 2.2.3 Benchmark

### 2.3 Online Sampling

#### 2.3.1 Interconnessione Arduino $\Leftrightarrow$ Companion

#### 2.3.2 Storage su file delle informazioni

### 2.4 Post Elaborazione con Matlab

#### 2.4.1 Conversioni Dati

#### 2.4.2 Creazione dei grafici e Filtraggio

## Capitolo 3

# Modello teorico di Controllo

*Se lo si desidera, utilizzare questo spazio per inserire un breve riassunto di ciò che verrà detto in questo capitolo. Inserire solo i punti salienti.*

### 3.1 Controllo a Errore Nullo

### 3.2 Simulazione Qualitativa su Simulink

## Capitolo 4

# Sviluppo Controllo reale

*Se lo si desidera, utilizzare questo spazio per inserire un breve riassunto di ciò che verrà detto in questo capitolo. Inserire solo i punti salienti.*

### 4.1 Codifica del controllore

### 4.2 Tuning delle costanti

### 4.3 Esperimenti

## Capitolo 5

# Conclusioni e sviluppi futuri

Inserire qui le conclusioni trovate con la tesi, ed eventualmente eventuali idee per sviluppi futuri.

# Appendice A

## Arduino Code

### 5.1 Set-up Registri

#### Tic Timer

---

```
1 void periodicTask(int time) { // time in micro secondi
2   // PWM pin Disable, modalita CTC(pt1)
3   TCCR2A = (0x0 << COM2A0) | (0x0 << COM2B0) | (0x2 << WGM20);
4   // CTC(pt2), Prescalere 256
5   TCCR2B = (0 << WGM22) | (0x6 << CS20);
6   // T_cklock * Twant / Prescaler = valore Registro
7   OCR2A = (int)(16UL * time / 256);
8   TIMSK2 = (1 << OCIE2A); // attivo solo l'interrupt di OC2A
9 }
```

---

Listing 5.1: Tic Timer

Questa funzione imposta il TIMER2 in modalità Fast PWM, ovvero che si resetta quando arriva al conteggio finale, e calcola il valore da mettere nel registro affinché il conteggio sia il più vicino possibile a tempo desiderato

#### Frequenza PWM

---

```
1 enum pwmFreq: char {
2   hz30, hz120, hz490, hz4k, hz30k
3 };
4
5 void setMotFreq(pwmFreq freq) {
6   // TCCR0B is for Timer 0
7   #define myTimer TCCR0B
8   switch (freq) {
9     // set timer 3 divisor to 1024 for PWM frequency of 30.64 Hz
10    case hz30:
11      myTimer = (myTimer & B11111000) | B00000101;
12      break;
13    case hz120:
14      // set timer 3 divisor to 256 for PWM frequency of 122.55 Hz
15      myTimer = (myTimer & B11111000) | B00000100;
16      break;
17    case hz490:
18      // set timer 3 divisor to 64 for PWM frequency of 490.20 Hz
19      myTimer = (myTimer & B11111000) | B00000011;
```

---

---

```

20     break;
21     case hz4k:
22         // set timer 3 divisor to      8 for PWM frequency of  3921.16 Hz
23         myTimer = (myTimer & B11111000) | B00000010;
24         break;
25     case hz30k:
26         // set timer 3 divisor to      1 for PWM frequency of 31372.55 Hz
27         myTimer = (myTimer & B11111000) | B00000001;
28         break;
29     default:
30         setMotFreq(hz4k);
31         break;
32     }
33     #undef myTimer
34 }

```

---

Listing 5.2: Frequenza PWM

Mediante questa funzione si modifica il valore del Prescaler per il TIMER 0, modificando la velocità di conteggio si ottiene un PWM con una periodo, e quindi frequenza, che varia.

#### Offset Calculation

---

```

1  #define offsetCalc(pin,n)          \
2  ({                                  \
3      long read = 0;                 \
4      for (int i = 0; i < 1 << n; i++) { \
5          read += analogRead(pin);    \
6          delay(1);                   \
7      }                               \
8      read = read >> 5;               \
9      read;                           \
10 })

```

---

Listing 5.3: Macro per calcolo Offset

La macro misura con una distanza temporale di 1 ms  $2^n$ -volte, la misura del Pin, e successivamente ne fa la media eseguendo un revers shift, questa tecnica di divisione semplicemente minimizza il tempo di calcolo, poiché ogni revers shift equivale a una divisione per 2, e si ha l'effetto di dividere per  $\frac{read}{2^n}$  in  $O(n)$  con un operazione per il processore molto semplice.

## 5.2 Generatore di Segnale

Per generare i segnali di controllo in Feed-Forward usati nel sistema, sono stati usati 2 diversi livelli di programmazione.

Un primo livello segnali di base, definiti su tutto  $\mathbb{R}$ , e usabili a piacere, e dei segnali composti e periodici da mandare durante l'esperimento. Tutti i segnali sono pensati per andare da -100% <-> 100%, è compito dell'attuazione eliminare le deadzone e traslare il controllo al valore più opportuno

### 5.2.1 Segnali Base

#### Rampa

---

```

1 int ramp(uint64_t t, int vStart, uint64_t tStart, int vEnd, uint64_t tEnd) {
2     // Saturazione
3     if (t < tStart)
4         return vStart;
5     else if (t > tEnd)
6         return vEnd;
7     // Retta
8     unsigned int dt = t - tStart;
9     return vStart + int((vEnd - vStart) / float(tEnd - tStart) * dt);
10 }

```

---

Listing 5.4: Rampa Saturata

La rampa è descritta come una retta nell'intervallo di interesse, saturata prima e dopo il tempo

desiderato

$$RampaSat(t) = \begin{cases} v_{start} + \frac{v_{end}-v_{start}}{t_{end}-t_{start}} * (t - t_{start}) & \forall t \in [t_{start}, t_{end}] \\ v_{start} & t < t_{start} \\ v_{end} & t > t_{start} \end{cases}$$

## 5.2.2 Segnali Composti

### Onda Triangolare

---

```

1 int triangleSignal(uint64_t t, int msQuartPeriod) {
2     static uint64_t startTic = 0;
3     int dTic = t - startTic;
4     int pwm = 0;
5     if (dTic < ticConvert(msQuartPeriod))
6         pwm = ramp(dTic, 0, 0, 100, ticConvert(msQuartPeriod));
7     else if (dTic < (ticConvert(msQuartPeriod) * 3))
8         pwm = ramp(dTic, 100, ticConvert(msQuartPeriod), -100, ticConvert(msQuartPeriod)
9             * 3);
10    else if (dTic < (ticConvert(msQuartPeriod) * 4))
11        pwm = ramp(dTic, -100, ticConvert(msQuartPeriod) * 3, 0, ticConvert(msQuartPeriod)
12            * 4);
13    else {
14        pwm = 0;
15        startTic = t;
16    }
17    return pwm;
18 }
```

---

Listing 5.5: Onda Triangolare Periodica

### Onda Trapezoidale

---

```

1 int rapidShot(uint64_t t) {
2     static uint64_t startTic = 0;
3     int pwmRapidShot;
4     long dTic = t - startTic;
5     if (dTic > t4) {
6         startTic = t;
7         pwmRapidShot = 0;
8         dTic = t - startTic;
9     }
10
11    if (dTic <= t1) {
12        pwmRapidShot = ramp(dTic, 0, 0, 100, t1);
13    } else if (dTic <= t2) {
14        pwmRapidShot = 100;
15    } else if (dTic <= t3) {
16        // falling ramp
17        pwmRapidShot = ramp(dTic, 100, t2, 0, t3);
18    } else if (dTic <= t4) {
19        pwmRapidShot = 0;
20    }
21    return pwmRapidShot;
22 }
```

---

Listing 5.6: Onda Trapezoidale Periodica



## 5.3 Codici Controllore

# Appendice B

## EMP Code

# Appendice C

## Matlab Post Elaborazione

# Elenco delle figure

1.1	Sensore di Corrente <b>ACS770</b> . . . . .	3
1.2	<b>ACS770</b> Schema a Blocchi . . . . .	4
1.3	<b>ACS770</b> Sensibilità rispetto Temperatura . . . . .	5
1.4	<b>ACS770</b> <i>Non-Linearity</i> . . . . .	5
1.5	<b>ACS770</b> Schema di collegamento . . . . .	6
1.6	Driver Motori IBT-2 TopView & PinOut . . . . .	8
1.7	Esperimento con Onda Triangolare . . . . .	10
1.8	Esperimento con Onda Trapezoidale . . . . .	11