



**TOR VERGATA**  
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA

**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 di attuazione, misurazione e controllo.~~

---

**RELATORE**

Daniele Carnevale

**CANDIDATO**

Emanuele Alfano

**CORRELATORI**

Marco Passeri

*Dedico questo traguardo ai miei cari nonni, e alla mia professoressa Beniamina*

*che sempre hanno saputo esserci per me e a voi affido i traguardi di domani.*

# Indice

<b>Ringraziamenti</b>	<b>1</b>
<b>Introduzione</b>	<b>2</b>
Cos'è la Fusione Termonucleare? . . . . .	2
Struttura di un Tokamak . . . . .	5
Obiettivi della Tesi . . . . .	7
<b>1 Elementi Costitutivi</b>	<b>8</b>
1.1 Trasformatore, un Modello di Tokamak . . . . .	9
1.1.1 Richiami di elettronica . . . . .	10
1.1.2 Modellazione Fisica . . . . .	14
1.1.3 Semplificazione Primario - Secondario . . . . .	15
1.1.4 Dal circuito alla dinamica . . . . .	16
1.1.5 Funzione di Trasferimento . . . . .	17
1.1.6 Misura del campo Elettrico del Plasma come indice per la Corrente . . . . .	19
1.2 Trasduttore di Corrente . . . . .	20
1.2.1 Sensore scelto . . . . .	20
1.2.2 Criticità . . . . .	21
1.2.3 Funzionamento Interno . . . . .	22
1.2.4 Connessione elettrica . . . . .	24

1.2.5	Dalla misura alla corrente . . . . .	24
1.3	Driver di Corrente - IBT-2 . . . . .	26
1.3.1	Schema Elettrico . . . . .	27
1.3.2	Connessione di Controllo . . . . .	28
1.3.3	Benchmark del Driver . . . . .	29
<b>2</b>	<b>Architettura di Sistema</b>	<b>31</b>
2.1	Architettura ad alto livello . . . . .	31
2.1	EMP - Libreria di Comunicazione Seriale . . . . .	33
2.1	Protocollo - COBS . . . . .	35
2.1.1	Metodo di codifica . . . . .	35
2.1.2	Caratteristiche chiave . . . . .	36
2.1.3	Integrità dei pacchetti . . . . .	37
2.1.4	Struttura del codice . . . . .	38
2.1.5	Logica di Comunicazione . . . . .	39
2.1.6	Code Flow . . . . .	40
2.1.7	Test di Codifica/Decodifica su ogni Device . . . . .	41
2.2	Online Sampling . . . . .	42
2.2.1	Interconnessione $\mu$ <b>Controllore</b> $\Leftrightarrow$ Companion . . . . .	43
2.2.2	Storage su file delle informazioni . . . . .	44
2.3	Post Elaborazione con Matlab . . . . .	45
2.3.1	Conversioni Dati . . . . .	45
2.3.2	Filtraggio senza distorsioni di fase . . . . .	45
<b>3</b>	<b>Stima del modello del sistema</b>	<b>46</b>
3.1	Metodo di stima automatico . . . . .	47

3.2	Tuning dei coefficienti . . . . .	49
3.3	Benchmark della stima . . . . .	50
<b>4</b>	<b>Modello teorico di Controllo</b>	<b>53</b>
4.1	Obiettivo di controllo . . . . .	53
4.2	Teorema del valore iniziale e del valore finale . . . . .	55
4.3	Controllo a errore nullo . . . . .	56
4.3.1	Design di controllore <i>PID-style</i> . . . . .	58
4.4	Simulazione <i>Qualitativa</i> su Simulink . . . . .	59
4.4.1	Design Base di controllo . . . . .	60
4.4.2	Design Avanzato di controllo . . . . .	61
4.5	Conclusioni per il design Avanzato . . . . .	66
<b>5</b>	<b>Sviluppo Controllo reale</b>	<b>67</b>
5.1	Discretizzazione Zero-Order Hold (Z.O.H.) . . . . .	69
5.2	Codifica del controllore . . . . .	71
5.3	Esperimenti . . . . .	71
5.3.1	Inseguimento singolo . . . . .	72
5.3.2	Inseguimento Triangolare . . . . .	73
5.3.3	Cambio riferimento in corsa . . . . .	74
5.4	Rumorosità nel controllo . . . . .	74
<b>6</b>	<b>Conclusioni e sviluppi futuri</b>	<b>75</b>
<b>Appendice A - Codice Arduino</b>		<b>77</b>
7.1	Set-up Registri . . . . .	77
7.1.1	Tic Timer . . . . .	77

7.1.2	Frequenza PWM . . . . .	77
7.2	Generatore di Segnale . . . . .	79
7.2.1	Segnali Base . . . . .	79
7.2.2	Segnali Composti . . . . .	80
7.3	Codici Controllore . . . . .	81
7.3.1	Classe Controllore . . . . .	82
<b>Appendice B - Codice EMP</b>		<b>84</b>
8.4	Pacchetti in EMP . . . . .	84
8.4.1	Definizione di 2 Pacchetti . . . . .	84
8.4.2	Pacchetti Multipli . . . . .	85
<b>Appendice C - Matlab Post Elaboration</b>		<b>86</b>
9.5	Importazione dei Dati . . . . .	86
9.5.1	Parsing Tabelle . . . . .	86
9.5.2	Conversione dei Dati . . . . .	87
9.6	Stima Parametri . . . . .	88
9.6.1	Stima parametri automatica . . . . .	88
9.6.2	Stima parametri manuale . . . . .	88
9.6.3	Plot dell'esperimento . . . . .	89
<b>Elenco delle figure</b>		<b>92</b>
<b>Elenco delle tabelle</b>		<b>93</b>
<b>Elenco dei codici</b>		<b>95</b>
<b>Bibliografia</b>		<b>97</b>

# Ringraziamenti

Questa tesi è stata resa possibile dal contributo nella mia vita di tante persone, che giorno per giorno mi hanno sempre dato il loro sostegno, a voi dedico questa mia Tesi.

Un ringraziamento speciale alla mia famiglia, in particolare a mia **Madre** e mio **Padre**: è grazie al vostro sostegno e incoraggiamento se oggi sono riuscito a raggiungere questo traguardo.

La forza di arrivare qui, oggi, però non è dovuta solo a loro, devo per forza ringraziare dell'affetto e il sostegno speciale da parte dei miei cari amici, che ogni giorno hanno condiviso con me gioie, sacrifici e successi, senza voltarmi mai le spalle, mi hanno dato la forza di arrivare a questo prezioso traguardo. **Filippo, Gabriele, Marta**, grazie di TUTTO.

Un pensiero in particolare vola verso la mia dolce **Nicoleta**, è sicuramente grazie all'affetto e le attenzioni che mi hai donato che sono riuscito a tenere dritto il timone ed arrivare qui oggi. Per terminare voglio ringraziare tutti i professori che negli ultimi 18 anni hanno guidato il mio cammino, loro che hanno sempre creduto in me e nelle mie capacità meritano tutta la mia gratitudine.

Un ringraziamento speciale va però alla mia professoressa e mentore **Beniamina Rauch** che fu la prima a vedere il mio potenziale e coltivarlo, so che ancora vegli su di me, non troverò mai le parole per ringraziarti abbastanza.

Oltre a lei ringrazio il mio relatore **Daniele Carnevale** che in questi anni universitari, da quando mi ha conosciuto ad oggi, ha sempre creduto in me e mi ha permesso di fare esperienze che mai avevo immaginato.

Un sentito grazie a tutti voi e buona lettura.

# Introduzione

La tesi si colloca nell'ambito delle tecniche di controllo per impianti Tokamak, come FTU (Frascati Tokamak Upgrade), Proto-Sphera ed ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor).

Essa è stata realizzata in collaborazione con il centro ricerche **ENEA** (Ente Nazionale per l'Energia e l'Ambiente) di Frascati e coordinato dal gruppo **CODAS** (COntrol and Data Acquisition System).

L'obiettivo finale del CODAS è di ~~replicare in miniatura~~ un intero impianto Tokamak, ~~con particolare attenzione al prototipo dell'architettura software per il monitoraggio e controllo dell'esperimento.~~

In questa tesi viene discussa la creazione e lo sviluppo del prototipo ~~della scheda embedded da usare per pilotare~~ la corrente delle bobine magnetiche, generando così il confinamento magnetico del Plasma necessario alla reazione di fusione nucleare ~~presente~~ all'interno del Tokamak.

## Cos'è la Fusione Termonucleare?

In fisica, per **Fusione Termonucleare**, si intende il processo mediante il quale i nuclei di due o più atomi vengono compressi tanto da far prevalere l'interazione forte sulla repulsione coulombiana, causando l'unione tra gli atomi e andando a formare così un nucleo la cui massa totale risulta minore della massa dei reagenti originali. La perdita di massa ha come conseguenza la liberazione di un'elevata quantità di energia, la quale conferisce al processo caratteristiche fortemente esotermiche.

La massa mancante viene trasformata in energia in accordo con l'equazione di Einstein:

$$E = (m_r - m)c^2$$

Dove  $m_r$  è la massa dei reagenti e  $m$  è la massa risultante.

Il processo di **Fusione Nucleare** avviene naturalmente all'interno delle stelle e trasforma l'*idrogeno* (di cui sono composte) in *elio*.

L'energia nucleare prodotta a seguito di questa reazione è elevatissima e per tale motivo risulta di forte interesse per la civiltà umana sviluppare tecniche sofisticate che ne permettano la raccolta in maniera controllata.

Tra i vantaggi di questa tecnologia troviamo sia motivi economici che ambientali e i principali possono essere sintetizzati in:

#### **Combustibile semi-inesauribile** :

Il combustibile (idrogeno e/o deuterio) è praticamente inesauribile ed è a disposizione di tutte le nazioni che abbiano uno sbocco sul mare. Il deuterio può essere estratto dall'acqua, anche se con costi energetici non indifferenti; per fare un esempio, un ditale pieno di deuterio equivale a 20 tonnellate di carbone in termini di energia.

Un lago di medie dimensioni contiene deuterio sufficiente a rifornire una nazione di energia per secoli utilizzando la fusione nucleare (ovviamente supponendo di sfruttarlo tutto).

#### **Rischi di Contaminazione grave sono nulli** :

Nessuna possibilità di incidenti come quelli di Černobyl' o di Three Mile Island in quanto il reattore non contiene sostanze radioattive come l'uranio o le scorie di fissione.

Inoltre, possibili incidenti, come fughe di trizio o perdite di liquido refrigerante, avrebbero un impatto ambientale e radiativo molto più contenuto e temporaneo.

#### **Assenza di inquinanti ambientali** :

Il processo di fusione, durante il quale gli atomi di idrogeno vengono fusi per creare elio, non rilascia nessun elemento inquinante da combustione (ad esempio anidride carbonica) e per

tanto nessun residuo può essere immesso nell'atmosfera impedendo il riscaldamento del pianeta tramite l'effetto serra.

**Nessuno prodotto derivato è adatto a fini Bellici :**

La mancanza di materiale radioattivo residuo, impedisce l'utilizzo dei reattori per la produzione di materiale per scopi bellici o terroristici, come proiettili radioattivi o materiale fissile per bombe nucleari.

**Livelli lievi di radiattività residua :**

Il processo di fusione può rendere radioattivi solo i materiali che compongono il Tokamak e i gas usati per il Plasma, ma entrambi gli elementi possiedono un tempo di decadimento alquanto breve, il ché implica che i rifiuti radioattivi hanno una scarsa durata nel tempo, inoltre le radiazioni prodotte non sono a energie elevatissime, semplificandone il contenimento attraverso contenitori schermati più economici e sicuri.

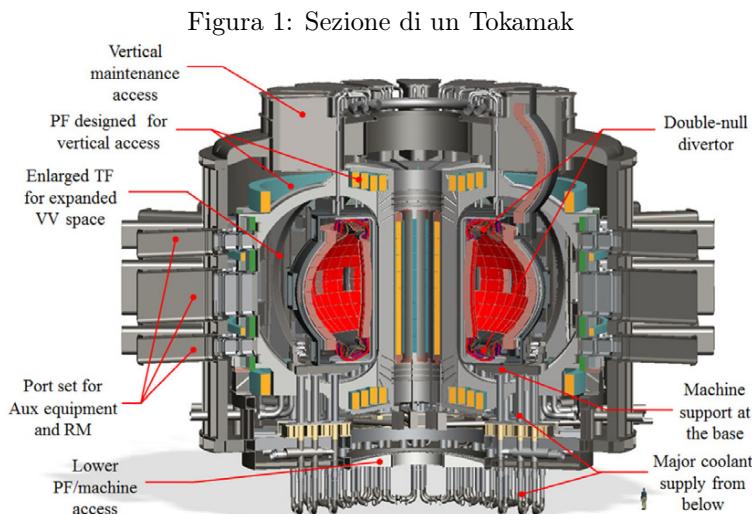
Questi e molti altri motivi rendono lo sviluppo di metodi per catturare l'energia da **Fusione Nucleare** con attraverso processi controllati di grande interesse per tutta la civiltà umana, essa potrebbe infatti essere la chiave per preservare l'ambiente del nostro pianeta e fornire al tempo stesso l'energia di cui l'umanità necessita.

In questa tesi faremo riferimento ad una classe di impianti sperimentali per la **Fusione Nucleare Controllata**, detti "**Impianti Tokamak**". È doveroso specificare che essi sono solo uno dei tanti design su cui attualmente si fa ricerca e sviluppo nel mondo, ma tra le varie proposte essi sembrano essere i più promettenti per aprire le porte a questa rivoluzione, poiché il principio di base è la replica delle condizioni che generano la fusione all'interno in una stella.

Tolte le difficoltà tecniche per le quali infatti è ancora una tecnologia in sviluppo, abbiamo la sicurezza sperimentale della fattibilità del processo, la nostra stessa civiltà non esisterebbe se il Sole non producesse questa forma di energia al suo interno.

## Struttura di un Tokamak

Un **Tokamak**<sup>1</sup> è una macchina di forma toroidale (a ciambella) in cui un gas (solitamente idrogeno) viene portato nello stato di Plasma e mantenuto coeso e lontano dalle pareti interne grazie ad un campo magnetico creato da elettromagneti esterni alla camera.



La forma del Tokamak a *toro* è studiata per permettere alle particelle del Plasma di muoversi all'interno del campo magnetico, creato all'esterno delle pareti (*Esterno del Vessel*) in un moto circolare. Questo movimento avviene poiché le particelle del Plasma sono per definizione cariche, e in quanto tali, se immerse in un campo magnetico esse tendono a muoversi seguendo una traiettoria elicoidale (detta anche *moto di ciclotrone*) attorno alle linee del campo magnetico, che in questo caso sono chiuse e contenute all'interno della sezione del Tokamak (*Interno del Vessel*).

L'uso di una confinazione magnetica di questo Plasma è dovuta all'impossibilità, per qualunque materiale, di resistere alle enormi temperature raggiunte dal Plasma durante la fusione in caso di un contatto diretto.

<sup>1</sup>Tokamak è l'acronimo russo per "camera toroidale magnetica"

La forma scelta per i Tokamak a Toro ha motivazioni fisiche, che discendono principalmente dall'equazione di Larmor. L'equazione descrive la distanza massima oltre il quale una particella carica non può allontanarsi da una linea di campo magnetico, definendo un limite superiore per lo spazio di contenimento delle particelle; questa distanza è detto appunto *raggio di Larmor*:

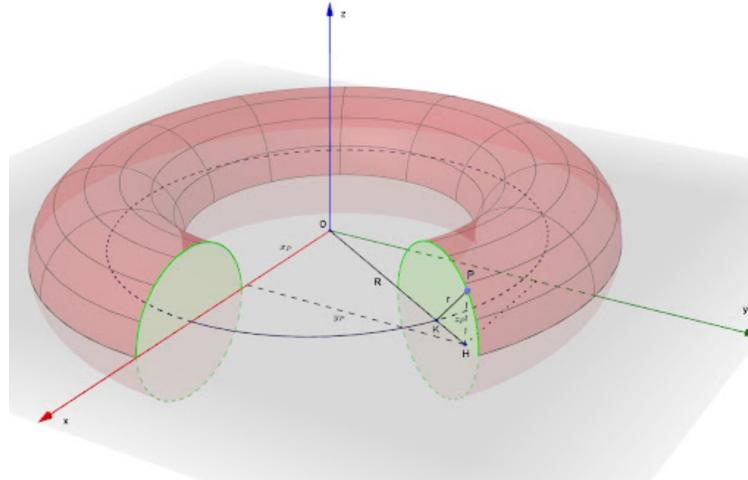
$$\rho = \frac{mv_{\perp}}{ZeB}$$

$v_{\perp}$  è la velocità della particella perpendicolare al campo magnetico.  
 $m$  è la sua massa.  
 $B$  è l'intensità del campo magnetico.  
 $Ze$  è la carica del portatore.

L'equazione vale anche in presenza di un campo magnetico curvo, se questa curva è chiusa si ottiene che la particella è confinata in uno spazio di volume finito ma rimane comunque libera ruotare all'infinito, accumulando così energia.

È stata scelta la geometria del **Toro** per rendere questa linea di campo una circonferenza esatta, la quale semplifica enormemente delle complesse equazioni fluido-dinamiche applicate al Plasma.

Figura 2: Geometria di un Toro



In sintesi un Tokamak è un impianto progettato per creare questo confinamento magnetico in maniera efficace e sicura, e ha la forma più consona per realizzare questo processo.

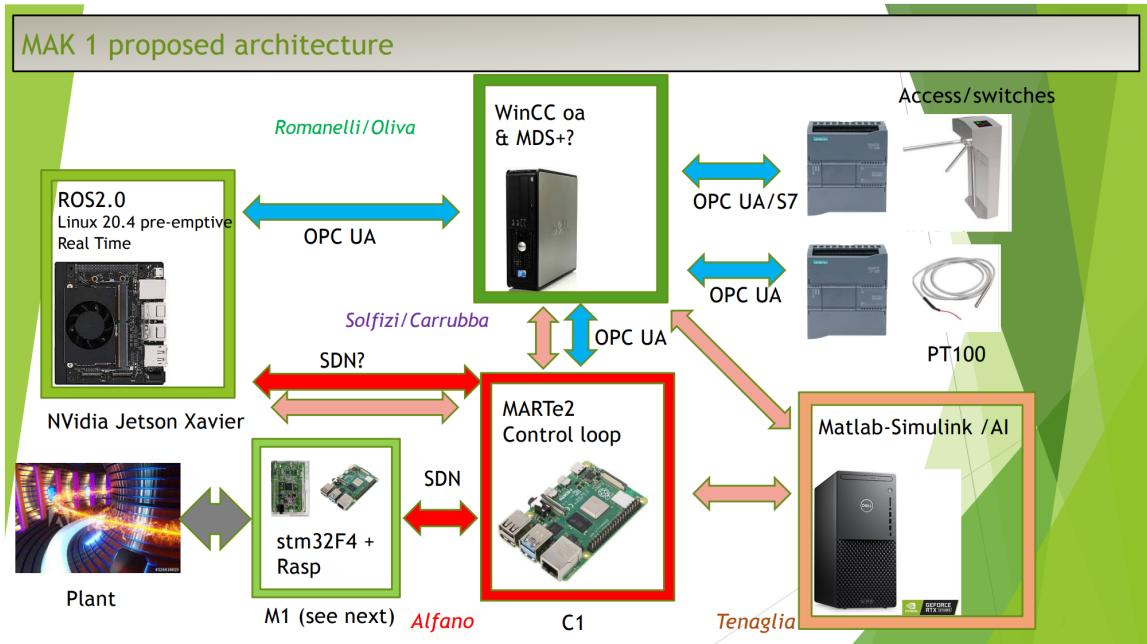
Oltre al mero contenimento però, il secondo obiettivo è quello di compattare il Plasma su se stesso (aumentando la forza del campo magnetico  $B$ ), così da avvicinare di più gli atomi tra loro (l'aumento di  $B$  causa una riduzione di  $\rho$ ).

Questo aumento di pressione, unito alle alte energie immesse nel Tokamak (la cui temperatura è **di decine di volte** superiore a quella della superficie del sole) aumentano le probabilità di scontro tra gli atomi, e quindi inizio di un processo di fusione tra essi.

## Obiettivi della Tesi

Il progetto complessivo portato avanti dall'ENEA prevede la realizzazione di prototipi a più livelli di un sistema Tokamak.

Figura 3: Architettura Complessiva Progetto ENEA



La mia parte di progetto (**Alfano**) consiste nello sviluppare e realizzare una scheda embedded. Essa dovrà pilotare la corrente nelle bobine dell'impianto Tokamak ed essere in grado di ricevere e inseguire i riferimenti per la corrente di **Plasma** attraverso la rete di interconnessione tra i dispositivi, basata sul **Framework di MARTE2**. (argomento trattato con dettaglio nella tesi).

Il controllo realizzato punta a inseguire il riferimento richiesto con un errore nullo.

In fine il dispositivo deve essere in grado di comunicare **in real time** l'**attuale** stato del sistema al resto della rete, **per permettere una diagnostica in tempo reale** dell'andamento dell'impianto.

# Capitolo 1

## Elementi Costitutivi

*In questo capitolo si vogliono descrivere e caratterizzare i 3 elementi salienti dell'esperimento:*

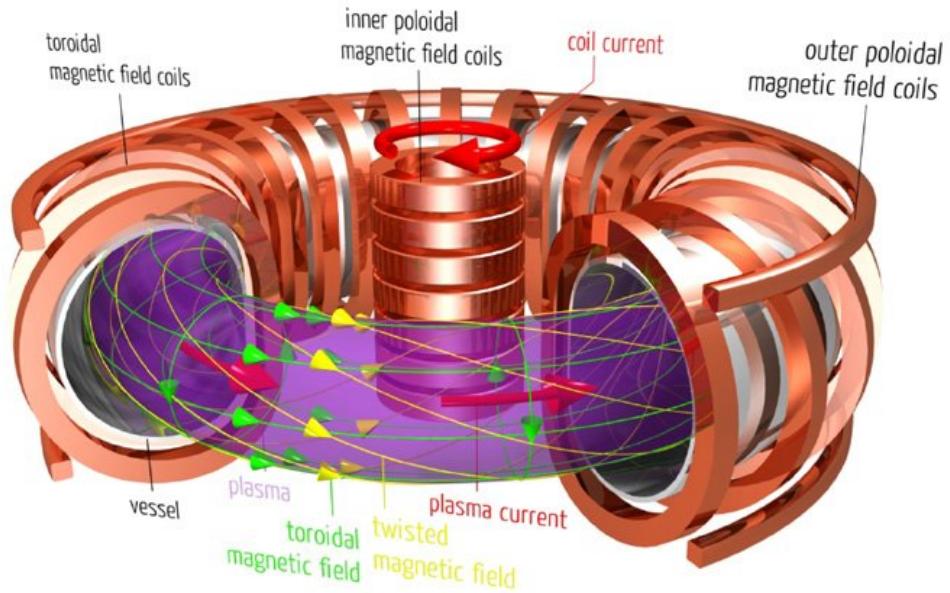
1. *Trasformatore, un Modello di Tokamak*
2. *Trasduttore di Corrente*
3. *Driver di Corrente - IBT-2*

Essi verranno analizzati al fine di mettere in luce i loro punti di forza, ovvero i motivi che hanno portato alla loro scelta, e si evidenzieranno eventuali problemi che affliggono in componenti, problemi di cui si è tenuto conto nello sviluppo del progetto per poterli annullare e/o compensare.

## 1.1 Trasformatore, un Modello di Tokamak

Come visto nell'introduzione, la tesi ha come obiettivo la prototipazione del sistema di controllo per le bobine magnetiche presenti in impianti tokamak.

Figura 1.1: Interno Tokamak



Le bobine (poloidali e toroidali) servono a controllare il Plasma presente nel *Vessel* dell'impianto e confinare il Plasma all'interno di un flusso compresso dentro la camera, le alte temperature e la forte compressione a cui è sottoposto il Plasma, permette di realizzare eventi di **Fusione Nucleare Controllata** tra gli atomi di idrogeno che compongono il Plasma usato dentro il Tokamak.

Essendo però impossibile usare in un ambiente controllato un vero Tokamak, specie in un laboratorio universitario, si è usato un sistema fisico equivalente per ricreare l'interazione tra le **Bobine e il Plasma**.

Il modello equivalente in questione è quello di **Trasformatore Elettrico** nella relazione *Primario-Secondario* (con ovviamente alcune approssimazioni e la semplificazione di varie *Non-Linearità* sui suoi parametri, a delle costanti).

Grazie a questa similitudine è stato possibile replicare in sicurezza la fisica presente all'interno di un Tokamak, nell'ambiente controllato del laboratorio usando una batteria in grado di erogare molti Ampere come fonte di alimentazione dell'esperimento.

### 1.1.1 Richiami di elettronica

Prima di modellare ed analizzare l'esperimento della tesi, è necessario richiamare qualche proprietà/concetto di elettronica per poter comprendere i passaggi matematici e fisici:

- Prima legge di Kirchhoff (legge dei nodi)
- Seconda legge di Kirchhoff (legge delle maglie)
- Induttore Ideale
- Induttanza
- Trasformatore Ideale Monofase

**Teorema 1.1.1** (Prima legge di Kirchhoff (legge dei nodi)).

*La somma algebrica delle intensità di corrente nei rami facenti capo allo stesso nodo è nulla.*

$$\sum I_k = 0 \quad (1.1.1)$$

■

**Teorema 1.1.2** (Seconda legge di Kirchhoff (legge delle maglie)).

*La somma algebrica delle f.e.m. (Forze Elettro Motrici) agenti lungo i rami di una maglia è uguale alla somma algebrica dei prodotti delle intensità di corrente di ramo per le rispettive resistenze (del ramo).*

$$\sum_{\forall k} V_k = \sum_{\forall k} f_{em_k} \quad (1.1.2)$$

■

Oltre ai teoremi di Kirchhoff, che ci serviranno per ricavare le equazioni della dinamica, enunciamo ora le proprietà degli induttori, indispensabili per poter parametrizzare il Trasformatore.

**Definizione 1.1.1** (Induttore Ideale).

Un *Induttore Ideale* si oppone solo alle variazioni di corrente, variando la tensione ai suoi capi di conseguenza, non presenta nessuna resistenza elettrica in caso di correnti costanti ai suoi capi.

Il suo valore è detto **coefficiente di autoinduzione**, tipicamente espresso con il simbolo  $L$ , la cui unità di è l'Henry [ $H$ ].

Un Induttore accumula energia all'interno di un campo magnetico, e questa relazione è descritta dall'equazione:

$$\Phi_B = Li$$

(1.1.5)

 $\Phi_B$  := Flusso magnetico $L$  := Coefficiente di autoinduzione

Applicando la legge di Faraday (ignorando momentaneamente la conservazione dell'energia, ovvero la legge di Lenz) alla circuitazione del circuito costituito dalla sola induttanza, si ottiene:

$$V = \frac{d\Phi_B}{dt}$$

(1.1.7)

 $V$  := Potenziale indotto ai morsetti del circuito

Derivando ora l'equazione 1.1.5 ad entrambi i membri rispetto al tempo, si ottiene:

$$\frac{d\Phi_B}{dt} = L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dt}$$

(1.1.8)

In molti casi fisici, però, l'induttanza può essere considerata costante rispetto al tempo (o tempo-invariante), da cui la formula che useremo risulta pari a:

$$\frac{d\Phi_B}{dt} = L \frac{di}{dt}$$

(1.1.9)

Combinando le equazioni precedenti si ottengono quindi i legami ingresso uscita rispetto alla tensione e alla corrente:

$$V(t) = L \frac{di(t)}{dt} \Leftrightarrow i(t) = \frac{1}{L} \int V(t) dt$$

(1.1.10)



Nel calcolo della 1.1.5, abbiamo omesso la legge di Lenz, poiché per parametrizzare l'induttore il segno '-' complica inutilmente i calcoli essendo in realtà assegnato dalla polarizzazione del circuito mentre si svolgono i calcoli.

La legge di Lenz prende molta importanza invece durante il fenomeno dell'**Induttanza**, ovvero quando 2 induttori vengono collegati tra loro per mezzo di un campo magnetico:

**Definizione 1.1.2** (Induttanza).

L'induttanza è la proprietà dei circuiti elettrici tale per cui la corrente (intesa variabile nel tempo) che li attraversa induce una **Forza ElettroMotrice** (f.e.m.) *Indotta* che si oppone alla variazione di corrente (legge di Lenz).

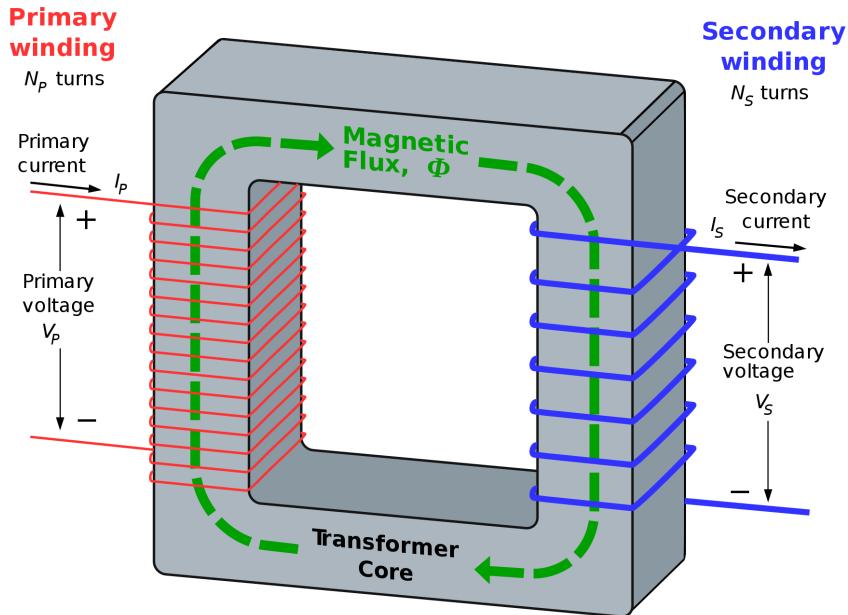
In questi scenari (vedi Trasformatore Elettrico ad esempio), 2 circuiti sono accoppiati magneticamente tra di loro attraverso 2 induttori, si ottiene quindi che, la variazione del flusso magnetico da parte del primo induttore, crea una **Forza ElettroMotrice** (f.e.m.) *indotta* contraria nell'altro circuito:

$$-\frac{d\Phi_B}{dt} = \mathcal{E} = V \quad (1.1.13) \quad \mathcal{E} := \text{Forza ElettroMotrice (f.e.m.) indotta}$$



Per concludere uniamo insieme i concetti di **Induttore Ideale** e **Induttanza** così da ottenere la descrizione matematica di un Trasformatore Monofase Ideale (*Trasformatore Monofase*<sup>1</sup>):

Figura 1.2: Trasformatore Ideale



<sup>1</sup>Senso di misura del secondario opposto nell'articolo a quello presentato nella tesi

**Definizione 1.1.3** (Trasformatore Ideale Monofase).

Il Trasformatore è una macchina elettrica, basata sul fenomeno dell'induzione elettromagnetica, il cui scopo è trasformare tra il circuito primario (ingresso) e il circuito secondario (uscita) la tensione e corrente in ingresso in un'altra scala mantenendo inalterata la potenza elettrica. Permette quindi il trasferimento per mezzo magnetico, di energia tra 2 circuiti fisicamente disaccoppiati, accoppiandoli induttivamente.

In un Trasformatore il circuito Primario e il Secondario condividono lo stesso campo magnetico, e conseguentemente lo stesso flusso  $\Phi_B$ .

Nel caso ideale, quindi, si ha che:

$$\Phi_B = \Phi_{B_P} - \Phi_{B_S} \quad (1.1.16)$$

Il '-' tra i campi magnetici è dovuto al verso delle correnti che creano 2 campi magnetici tra loro contrapposti

Siccome tale flusso varia nel tempo, induce nei due avvolgimenti delle f.e.m. (vedi [Induttanza](#)):

$$e_p = N_1 \frac{d\Phi_B}{dt}; e_s = -N_2 \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (1.1.17)$$

I segni non sono entrambi concordi a causa del verso del flusso, che nel primario è concorde e nel secondario discorde (e qui torna la forza di Lenz).

Viste dai morsetti del trasformatore, abbiamo che le tensioni istantanee (dovute alle correnti presenti nei 2 rami) sono pari a:

$$\begin{cases} V_P = R_P I_P + L_{PP} \dot{I}_P - L_{SP} \dot{I}_S \\ V_S = R_S I_S - L_{PS} \dot{I}_P + L_{SS} \dot{I}_S \end{cases} \quad (1.1.18)$$

Dove  $R_P$  e  $R_S$  rappresentano le resistenze equivalenti viste dai morsetti (i carichi).

Con i coefficienti di mutua induttanza che si ricavano dalla Def di [Induttore Ideale](#):

$$\begin{aligned} L_{pp} &= \frac{N_P \Phi_{B_P}}{i_P} & L_{ps} &= \frac{N_S \Phi_{B_P}}{i_P} \\ L_{sp} &= \frac{N_P \Phi_{B_S}}{i_S} & L_{ps} &= \frac{N_S \Phi_{B_S}}{i_S} \end{aligned}$$



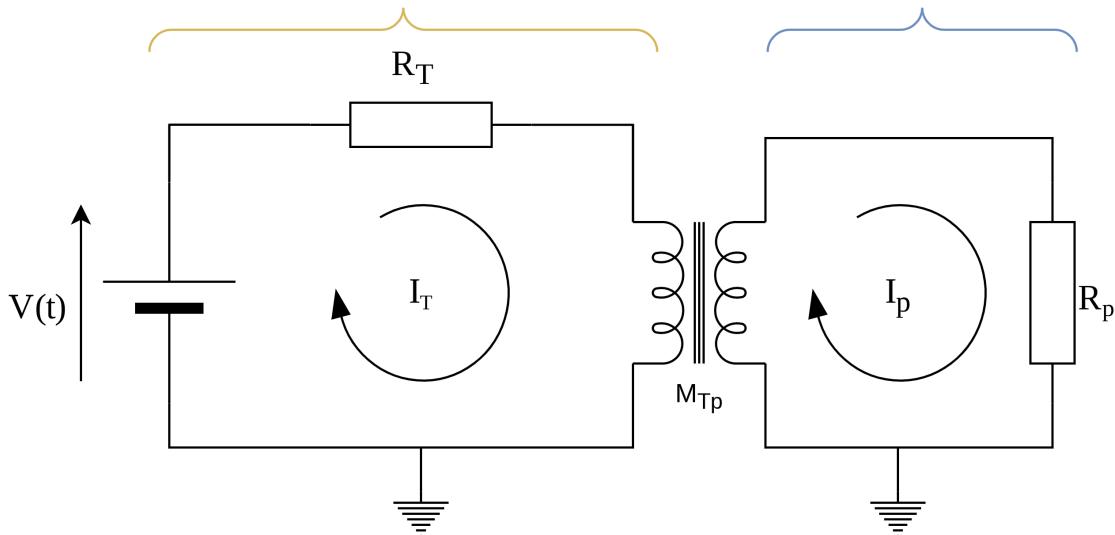
Arrivati a questo punto abbiamo gli strumenti necessari per poter modellare matematicamente l'esperimento in esame nella tesi.

### 1.1.2 Modellazione Fisica

Usando i concetti esposti, vediamo ora una buona approssimazione, passante per un modello lineare a parametri costanti della dinamica tra **Bobina e Plasma**.

Come descritto nell'articolo di Romero et al., «Real time current profile control at JET», è possibile modellare la dinamica **Bobina - Plasma** come fosse il circuito di un **Trasformatore Ideale Monofase**:

Figura 1.3: Circuito Equivalente Bobina/Plasma  
 Transformatoro/Primario Plasma/Secondario



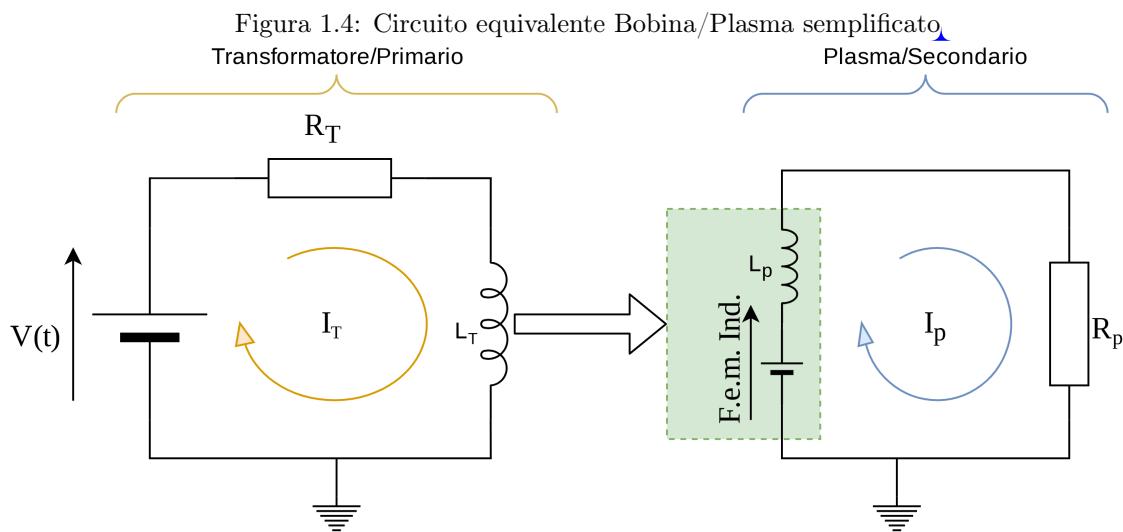
- $V(t)$  := Tensione di controllo della Corrente  $I_T$
  - $I_T$  := Corrente del Trasformatore
  - $R_T$  := Resistenza equivalente Trasformatore
  - $I_p$  := Corrente di Plasma
  - $R_p$  := Resistenza di Plasma
  - $M_{Tp}$  := Coefficiente di Induttanza Trasformatore → Plasma

**Difformità dalla realtà** Nella realtà  $R_p$  e  $M_{Tp}$  sono dei parametri che variano in funzione dello stato del Plasma (Temperatura, Energia, Evoluzione dell'esperimento, ecc. . .), ma per ovvie ragioni di difficoltà nel riprodurre in laboratorio simili *Non-Linearità*, noi prenderemo per costanti questi parametri.

### 1.1.3 Semplificazione Primario - Secondario

Sempre dallo stesso articolo di Romero et al., «Real time current profile control at JET», si evince che è possibile modellare questa relazione tra i 2 circuiti prendendo in considerazione **solo** le forze di induzione dovute alla corrente che il Primario trasferisce sul Secondario, ciò permette di semplificare ulteriormente il circuito trascurando le correnti indotte dal Plasma dentro la Bobina del Primario.

Usando queste osservazioni si ottiene quindi il circuito equivalente:



- $V(t)$  := Tensione di controllo della corrente  $I_T$
- $I_T$  := Corrente del Trasformatore
- $R_T$  := Resistenza equivalente Trasformatore
- $I_p$  := Corrente di Plasma
- $R_p$  := Resistenza di Plasma
- $M_{Tp}$  := Coefficiente di Induttanza Trasformatore → Plasma
  - $L_T$  := Induttanza equivalente Trasformatore
  - $L_p$  := Induttanza equivalente Plasma

Usando questa semplificazione dall'equazione 1.1.18 del trasformatore ignoriamo che la tensione sul Primario è influenzata dal Secondario; in questa condizione il circuito del Primario evolve come sistema indipendente rispetto al Secondario, e la sua evoluzione influenza il Secondario senza risentirne.

### 1.1.4 Dal circuito alla dinamica

Analizziamo ora la dinamica del circuito semplificato 1.1.3 analizzando le 2 maglie del circuito:

#### Dinamica di Plasma

Per calcolare la dinamica della corrente di Plasma usando la [Seconda legge di Kirchhoff \(legge delle maglie\)](#) sulla maglia del secondario:

$$F_{em} = L_p \dot{I}_p + I_p R_p$$

Grazie al principio dell'[Induttanza](#) siamo in grado di risalire al termine generatrice della  $F_{em}$ :

$$F_{em} = -M_{Tp} \dot{I}_T$$

Perciò, unendo insieme i blocchi otteniamo:

$$-M_{Tp} \dot{I}_T = L_p \dot{I}_p + I_p R_p \quad (1.1.22)$$

Da notare la somiglianza con l'equazione del trasformatore 1.1.18

**Osservazione 1.1.1.** Dalla eq 1.1.22 è interessante notare che rendere la corrente di Plasma costante, equivale a fissare una  $F_{em}$  di costante.

In un Tokamak reale, anche se l'obiettivo è controllare la corrente di Plasma, misurarla direttamente risulta essere problematico, a tale scopo nei Tokamak reali, viene usata la **Tensione di Loop** (Cianfarani, «**MAGNETIC DIAGNOSTICS FOR FUSION MACHINES**») come indicatore della  $I_p$ , che nel nostro caso coincide esattamente con la  $F_{em}$  del secondario (problematica discussa in seguito, vedi [Misura del campo Elettrico del Plasma come indice per la Corrente](#)). ✓

#### Dinamica del Trasformatore

Vediamo ora la dinamica della corrente del Trasformatore, in funzione della *Tensione di controllo*.

Il calcolo avviene seguendo gli stessi procedimenti della corrente di Plasma, usando sempre il [Seconda legge di Kirchhoff \(legge delle maglie\)](#), e si ottiene come equazione di maglia:

$$V(t) = L_T \dot{I}_T + I_T R_T \quad (1.1.23)$$

### 1.1.5 Funzione di Trasferimento

Nella sezione "Dal circuito alla dinamica" abbiamo ottenuto la dinamica istantanea dei 2 rami del circuito [1.1.3](#).

Vogliamo ora ricavare le funzioni di trasferimento dei 2 rami e trovare così la funzione di trasferimento Ingresso uscita del Trasformatore.

#### Funzione di Trasferimento Plasma

Volendo calcolare la funzione di trasferimento per le dinamiche forzate, partiamo dall'equazione [1.1.22](#) risolvendola per condizioni iniziali nulle.

$$\begin{aligned} sI_p L_p + I_p R_p &= -sI_T M_{Tp} \Rightarrow I_p(sL_p + R_p) = -sI_T M_{Tp} \Rightarrow \\ I_p(s) &= \frac{-sM_{Tp}}{(sL_p + R_p)} I_T(s) \end{aligned}$$

Arrivando così a scrivere come funzione di trasferimento per il Plasma (Secondario):

$$\boxed{\frac{I_p(s)}{I_T(s)} = \frac{-sM_{Tp}}{(sL_p + R_p)}} \quad (1.1.24)$$

#### Funzione di Trasferimento Trasformatore

Similmente a quanto fatto per Plasma, partendo dall'equazione [1.1.23](#) in condizioni iniziali nulle abbiamo:

$$\begin{aligned} sI_T L_T + I_T R_T &= V(s) \Rightarrow I_T(sL_T + R_T) = V(s) \Rightarrow \\ I_T(s) &= \frac{1}{(sL_T + R_T)} V(s) \end{aligned}$$

Ottenendo così la funzione di trasferimento del Trasformatore (Primario):

$$\boxed{\frac{I_T(s)}{V(s)} = \frac{1}{(sL_T + R_T)}} \quad (1.1.25)$$

**Osservazione 1.1.2.** La funzione di trasferimento che abbiamo ottenuto rispecchia il circuito dell'esperimento lasciandoci come variabile di controllo la  $V(t)$ .

A livello teorico però, noi controlliamo la corrente sul primario e puntiamo a osservare una corrente sul secondario, abbiamo quindi un sistema che si controlla in corrente e che ha un'uscita in corrente.

Sarebbe quindi utile e opportuno allora riassegnare l'ingresso di tensione mettendo in evidenza la variabile virtuale  $I_{ref}$ :

$$V(t) = I_{ref}(t) \cdot R_T \Rightarrow I_{ref}(t) = \frac{V(t)}{R_T}$$

Ottenendo quindi come funzione di trasferimento del Trasformatore (Primario):

$$I_T(s) = \frac{R_T}{(sL_T + R_T)} I_{ref}(s) = \frac{1}{(s\frac{L_T}{R_T} + 1)} I_{ref}(t) \quad (1.1.26)$$

In questa forma possiamo osservare che, per  $I_{ref}(t) = I_{ref}$  costante, superato il transitorio, si ottiene  $I_T = I_{ref}$ , da cui abbiamo che la corrente sul trasformatore viene attuata con un certo ritardo dovuto alla costante di tempo  $\tau = \frac{L_T}{R_T}$  ✓

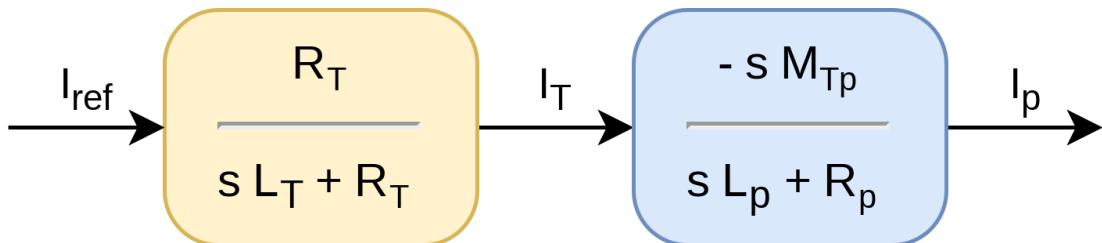
### Funzione di Trasferimento Complessiva

Connettendo in serie i 2 blocchi e tenendo conto dell'osservazione 1.1.2 si ottiene:

$$P(s) = \frac{I_p(s)}{I_{ref}(s)} = \frac{I_T(s)}{I_{ref}(s)} \cdot \frac{I_p(s)}{I_T(s)} = -\frac{sM_{Tp}}{(sL_p + R_p)(sL_T + R_T)} \quad (1.1.27)$$

Che vista come schema a blocchi diventa:

Figura 1.5: Schema a Blocchi Corrente di Plasma



Essendo il segno di uscita del segnale inverso rispetto al segnale d'ingresso, eliminiamo questo fastidio aggiungendo matematicamente un '-' e a livello di prototipo invertendo i fili sul Secondario. Così facendo otteniamo come funzione di trasferimento complessiva:

$$P_{pos}(s) = -P(s) = \frac{sM_{Tp}}{(sL_p + R_p)(sL_T + R_T)} = \frac{-I_p(s)}{I_{ref}(s)} \quad (1.1.28)$$

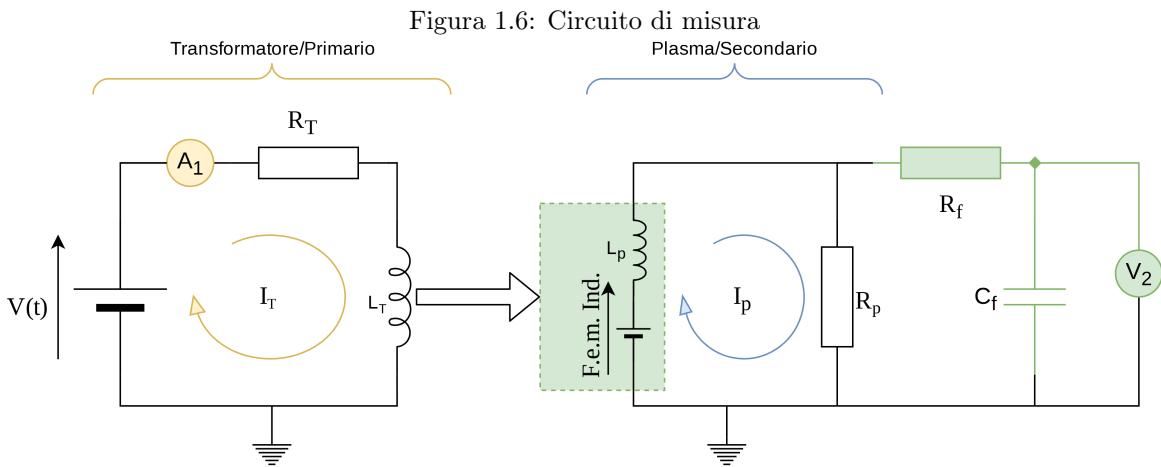
### 1.1.6 Misura del campo Elettrico del Plasma come indice per la Corrente

Riprendendo l'equazione della corrente di Plasma 1.1.22, abbiamo che il campo elettrico indotto sul Plasma, ovvero la  $F_{em}$ , dipende direttamente dallo stato della corrente di Plasma  $I_p$ .  
 Da essa abbiamo che per  $I_p$  costanti, anche la  $F_{em}$  è costante.

Nel caso del trasformatore si potrebbe fisicamente misurare la corrente di Plasma, simulata dalla corrente sul secondario, ma nel caso di un impianto reale, risulta evidente che è impossibile.

Proprio per questo, come descritto da Cianfarani, «MAGNETIC DIAGNOSTICS FOR FUSION MACHINES», a pagina 12, si usa come indice di misura Tensione di giro  $V_{loop}$  ( $\Rightarrow F_{em}$  nel nostro esperimento).

Perciò il circuito reale usato nell'esperimento della tesi, comprensivo di misure è:



Abbiamo quindi, tra ingresso e uscite i parametri di:

- $I_T$  misurata dal sensore di corrente  $A_1$  **Trasduttore di Corrente**.
- $F_{em}$  misura dal voltmetro  $V_2$  (che è realizzata da un Pin analogico del  **$\mu$ Controllore**) e che rappresenta un indice per la corrente  $I_p$  quando essa è costante (eq 1.1.22).
- $V(t)$  generata in base alla legge di controllo, e attuata mediante PWM (Redazione, **Nozioni di PWM**) dal driver di corrente **Driver di Corrente - IBT-2**.

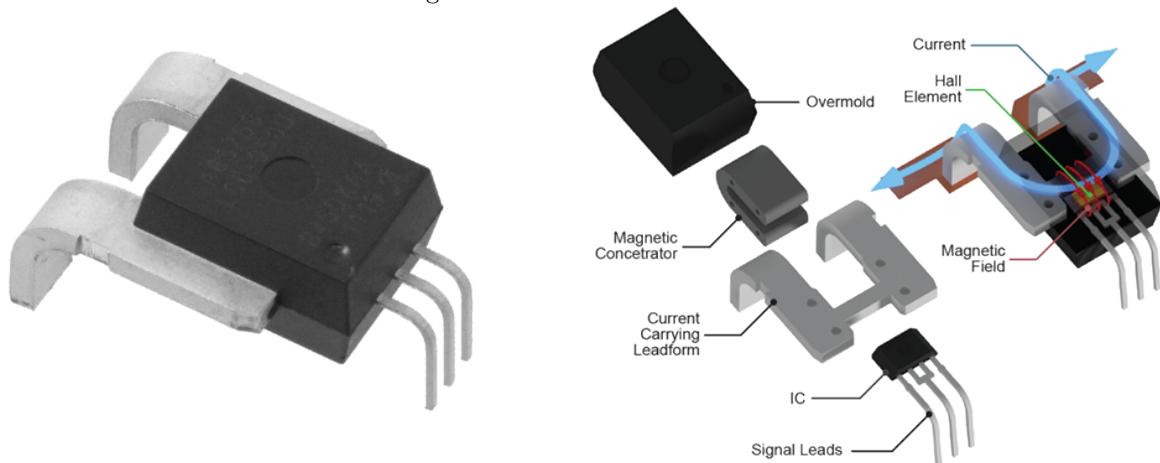
## 1.2 Trasduttore di Corrente

Come già discusso precedentemente, l'obiettivo della tesi è di controllare la corrente sul secondario.

In tale ottica la misura della corrente sul Primario potrebbe non essere una misura di interesse.

Essendo però un lavoro di ricerca, si è preferito poter misurare la corrente effettivamente circolante nel Primario del trasformatore, così da poter meglio interpretare i dati misurati senza ambiguità.

Figura 1.7: Sensore di Corrente



### 1.2.1 Sensore scelto

Per misurare la corrente del primario, si è usato il sensore di Corrente Allegro, [High-Precision Linear Current Sensor](#). La famiglia di sensori ha in generale le seguenti caratteristiche:

Tabella 1.1: Riassunto caratteristiche

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	

Inoltre, delle tante varianti esistenti, si è scelto di usare la ACS770LCB-100B-PFF-T, le cui caratteristiche chiave sono:

Tabella 1.2: ACS770LCB-100B-PFF-T Particolarità

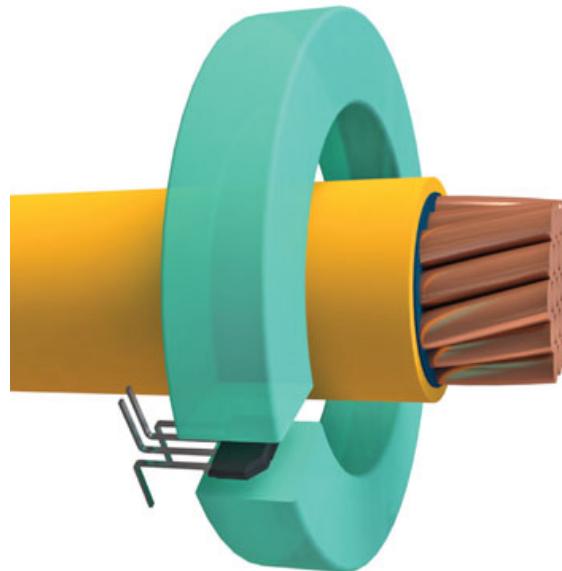
Primary Sampled Current:	$\pm 100 \text{ A}$
Sensitivity Sens (Typ.)	20(mV/A)
Current Directionality	Bidirectional
$T_{OP}$	-40 to 150 ( $^{\circ}\text{C}$ )

Le caratteristiche più importanti di questo trasduttore sono l'ampio margine di misura, e la robustezza alle variazioni di temperatura, che insieme rendono il dispositivo perfetto per misurare le energie dei nostri esperimenti attuali, e lo rendono *future-proof* per esperimenti futuri quando si useranno energie superiori.

### 1.2.2 Criticità

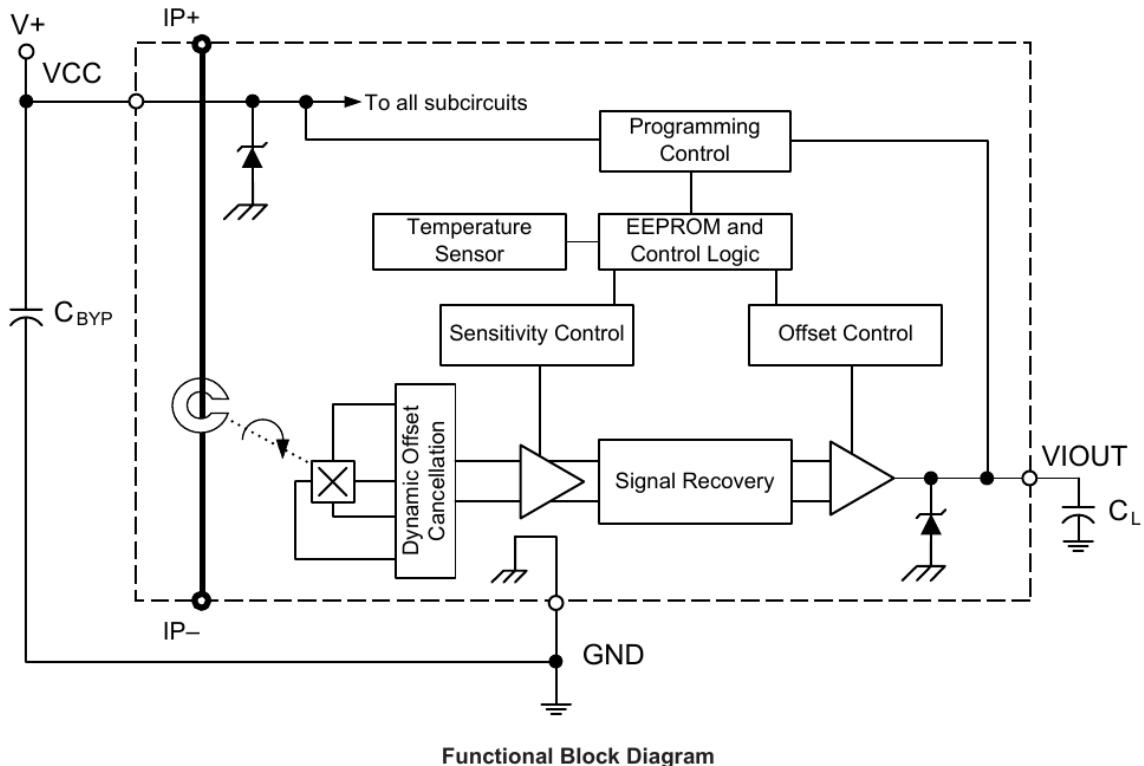
Unico punto dolente, ma comune al tutti i sensori a effetto induttivo, è proprio il suo principio di funzionamento: essendo il sensore basato su un l'effetto Hall, ovvero una misura diretta del campo magnetico indotto dalla corrente nel conduttore, lo rende soggetto alle variazioni di campo magnetico prodotte propri dal Trasformatore Centrale, che nei suoi momenti di massimo flusso, genera ovviamente un campo magnetico non indifferente.

Figura 1.8: Misura di corrente per effetto Hall



### 1.2.3 Funzionamento Interno

Figura 1.9: Schema a Blocchi

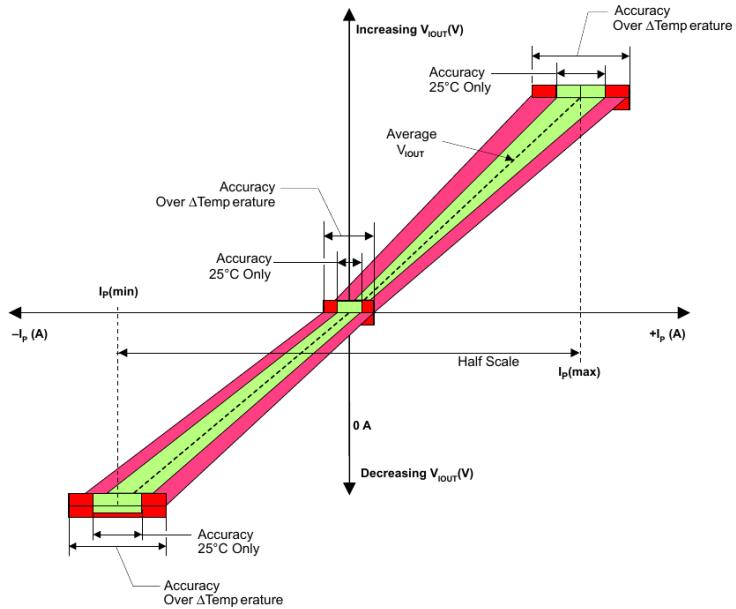


Functional Block Diagram

Tra le caratteristiche chiave dell'Allegro, [High-Precision Linear Current Sensor](#), troviamo il disaccoppiamento fisico tra la corrente da misurare e il circuito di misura (ben visibile nello schema a blocchi). Questa caratteristica chiave, garantisce la salvaguardia del circuito logico a valle, dai possibili eventi catastrofici a monte.

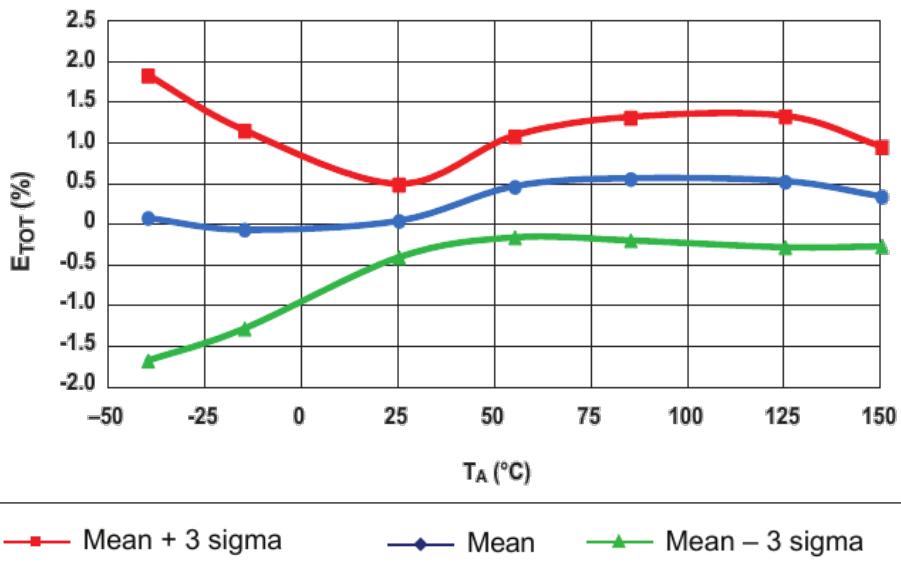
Esso è inoltre fornito di sensori di temperatura e sistemi di *Signal Recovery* che permettono all'hardware stesso di compensare parzialmente *Non-Linearità* termiche della misura per effetto Hall, ottenendo un output assimilabile a un segnale lineare:

Figura 1.10: Sensibilità



Come si può vedere dal grafico, gli errori sono tanto più marcati quanto maggiore è la corrente da misurare ed inoltre questo errore ha una forte dipendenza dalla temperatura dell'esperimento:

Figura 1.11: Temperatura/NonLinearità  
**Total Output Error versus Ambient Temperature**



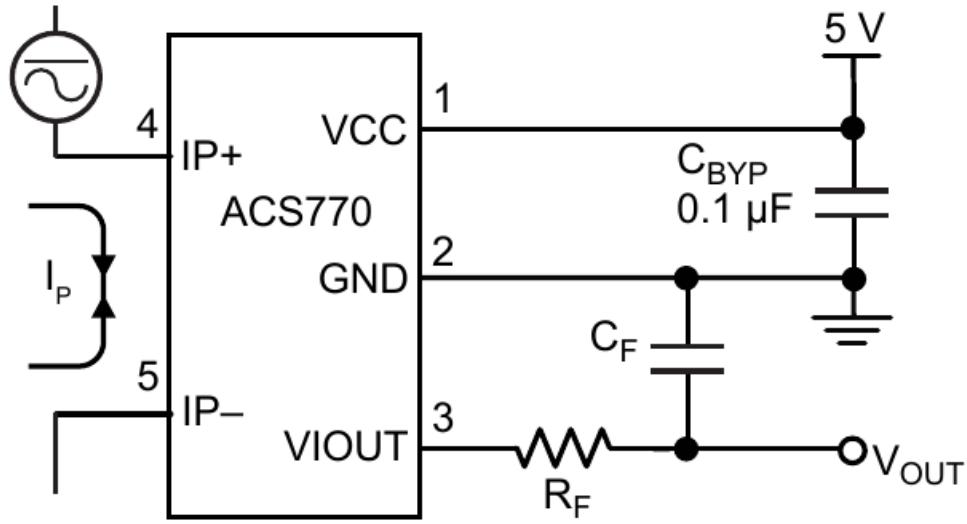
Il quale però non è mai, neanche negli esperimenti più sfortunati, superiore al  $\pm 2\%$ .

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

### 1.2.4 Connessione elettrica

La connessione del sensore è particolarmente semplice, richiedendo esternamente solo un alimentazione stabilizzata e portando subito in uscita la misura di corrente sotto forma di tensione.

Figura 1.12: Collegamento dal Datasheet



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

Questa scelta è stato possibile prenderla poiché la corrente per alimentare l'esperimento proviene da una batteria con un'alta capacità di scarica istantanea (fino a 1000A), da cui l'assenza di disturbi sul segnale di corrente e la possibilità di prendere questa scelta.

### 1.2.5 Dalla misura alla corrente

Il trasduttore è basato sull'effetto Hall, il quale permette di misurare una corrente attraverso il campo magnetico che crea, e riporta questa misura sotto forma di tensione.

I sensori della famiglia Allegro, *High-Precision Linear Current Sensor* propongono vari modelli che differiscono tra loro principalmente per la **Sensibilità** di misura e la lettura di corrente *Bi-direzionale*.

o *Mono-direzionale*, in funzione della scala di misura che si vuole avere e della presenza di corrente alternata o continua. Per i nostri scopi abbiamo preso il modello: 'ACS770LCB-100B-PFF-T', di cui i parametri sono riportati in tabella 1.2.1.

Usando la sensibilità riportata in tabella, abbiamo che la formula di conversione per ottenere la corrente letta è:

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

**Rimozione Offset** Essendo però l'ACS770 ad alimentazione singola (0–5V), ma la corrente misurabile **Bi-Direzionale**, sorge la necessità di spostare il riferimento della corrente nulla ad una tensione superiore allo 0V.

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

$$I_{read} = \frac{V_{Read} - V_{offset}}{V_{sense}} \frac{[V]}{[V/A]} \quad (1.2.1)$$

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.

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

$$V_{step} = \frac{V_{cc}}{2^{10} - 1} = 4,887mV \quad (1.2.2)$$

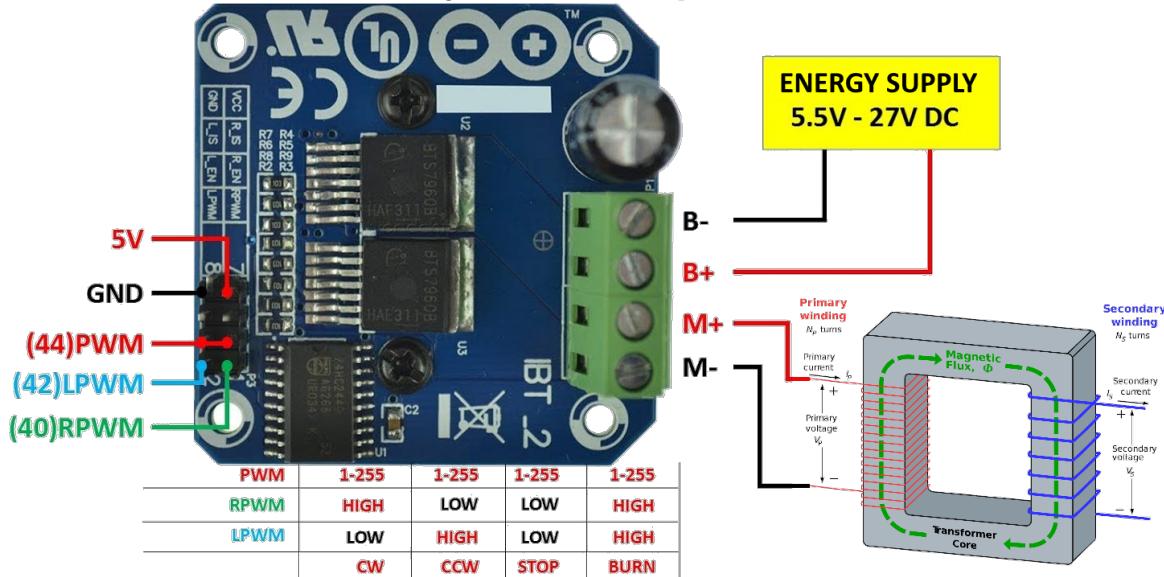
Il che equivale a una **Sensibilità di Corrente** del  $\mu$ Controllore pari a:

$$I_{step} = \frac{V_{step}}{V_{sense}} = 244,379mA \quad (1.2.3)$$

### 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 Handsontec, [BTS7960 High Current 43A H-Bridge Motor Driver](#).

Figura 1.13: IBT-2 TopView.



Esso non è un comune Ponte-H integrato: per poter gestire potenze superiori è stato costruito usando 2 Half-Bridge (Infineon, [BTS7960B High Current PN Half Bridge NovalithIC T](#)) collegati assieme mediante una opportuna logica per ricreare un normale Ponte-H.

Questa scheda in particola ha prestazioni interessanti per gli scopi di questa tesi, i principali sono elencati di seguito:

Tabella 1.3: IBT-2 Specifiche

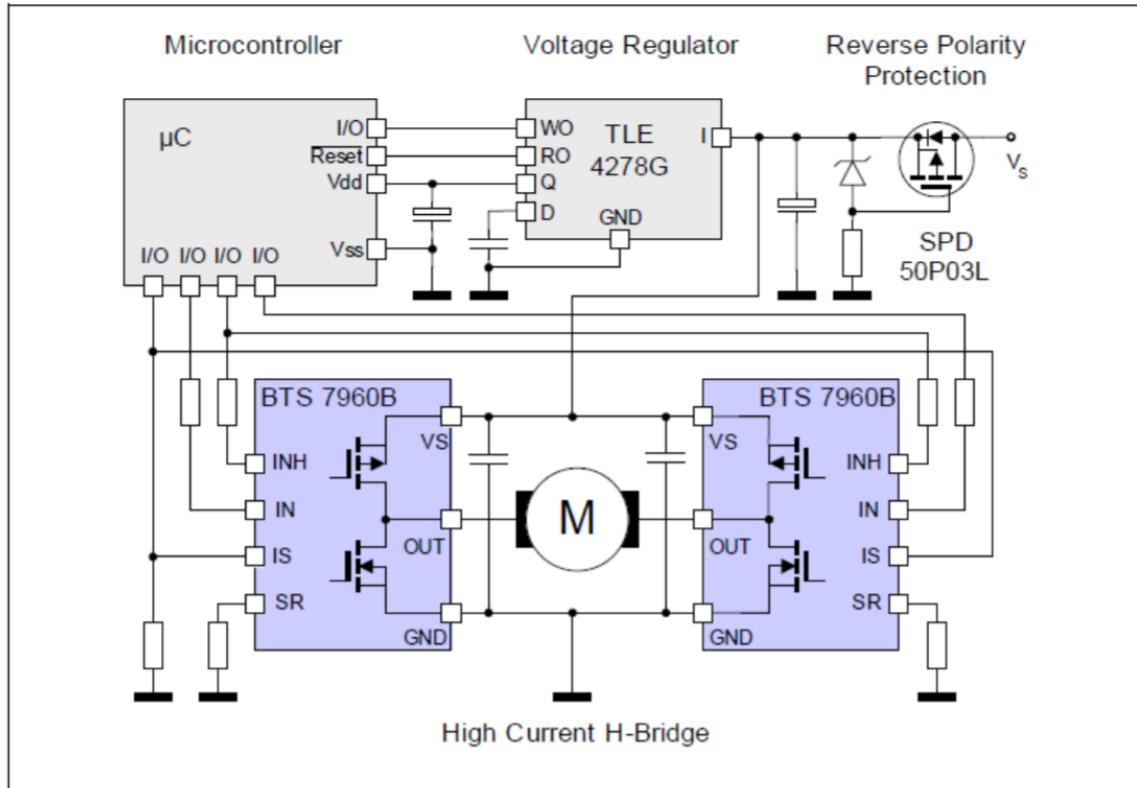
Power Input Voltage:	6 – 27 V
Peak current:	43 A
Massima Frequenza di PWM:	25 kHz
Protezione Sovra Tensioni	
Disaccoppiamento Ingresso di Potenza/Logica di controllo	

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 Schema Elettrico

Al suo interno il driver è composto da 2 Half-Bridge Infineon, [BTS7960B High Current PN Half Bridge NovalithIC T](#), connesse secondo lo schema:

Figura 1.14: IBT-2 Schema Elettrico



Il  $\mu\text{C}$  è protetto dal carico connesso all'interno del BTS7960b, lasciando al  $\mu\text{C}$  solo il compito di controllare i segnali che commutano lo stato dei 2 Half-Bridge.

### 1.3.2 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.

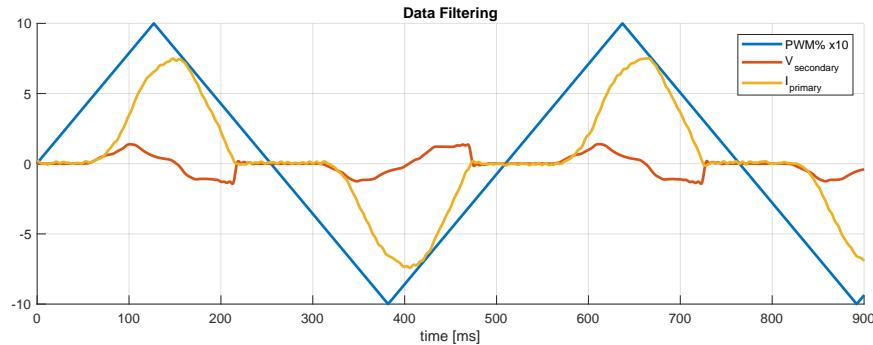
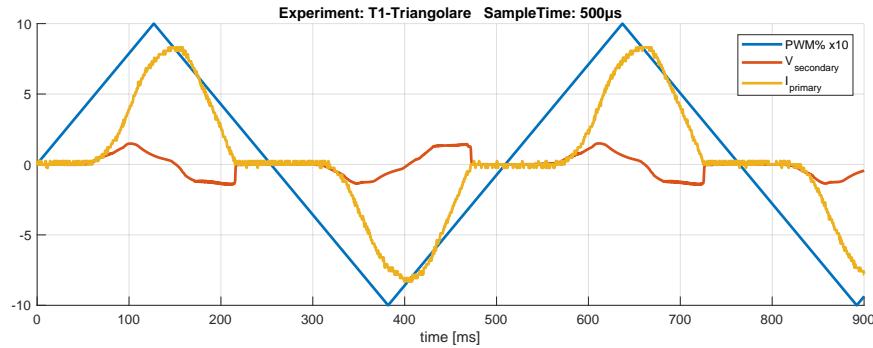
Per il nostro esperimento si è scelto di usare il collegamento **Singolo PWM** così da evitare spiacevoli sorprese e avere il PWM di controllo sempre sincronizzato.

### 1.3.3 Benchmark del Driver

Il driver sulla carta ha buone prestazioni, dal datasheet non risaltano *Non-Linearità*, esse invece sono presenti e per farle risaltare si sono effettuati 2 segnali di input:

1. Onda Triangolare Periodica

Figura 1.15: Onda Triangolare

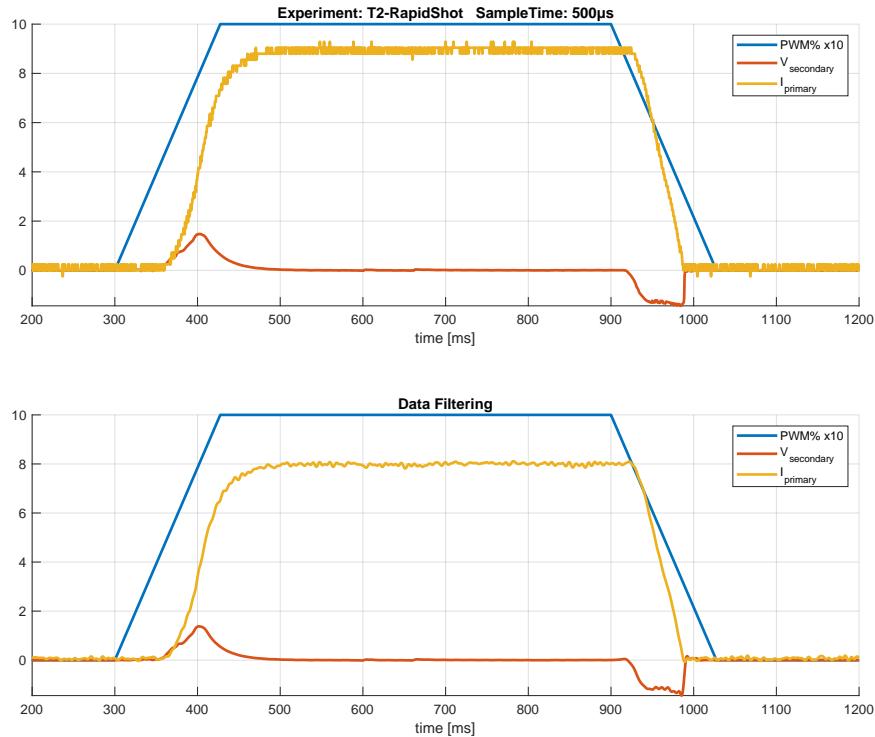


**Dead-Zone Inferiore** L'onda triangolare si presta bene per far risaltare la problematica della Dead-Zone Inferiore, infatti in tutti gli intorni in cui il segnale passa per 0, è possibile vedere come tanto la corrente quanto la tensione sul secondario non vari minimamente, indice evidente dell'assenza di corrente e quindi della presenza della **Dead-Zone**.

Per calcolare la soglia di **Dead-Zone Inferiore** è sufficiente vedere il primo valore di PWM per cui il sistema risponde dopo il passaggio per 0.

## 2. Onda Trapezoidale Periodica (RapidShot)

Figura 1.16: Onda Trapezoidale (*Rapid Shot*)



**Dead-Zone Superiore** Usando il segnale *Rapid Shot* mettiamo in evidenza la presenza della

*Dead-Zone Superiore*, visibile sotto forma di ritardo di attuazione nella rampa di discesa.

Il ritardo è pari a circa 20ms (*guarda 900ms*), e come detto è causato dalla seconda Dead-Zone presente nel driver.

Il driver soffre di questi problemi poiché per i Duty-Cycle *Alti* e *Bassi* nel PWM, prima uno e poi l'altro Half-Bridge, non fa in tempo a commutare che il segnale ha nuovamente cambiato valore, causando di fatto questa assenza di attuazione e quindi la Dead-Zone. Sapendo della presenza di queste 2 Dead-Zone, risaliamo ai loro valori di soglia andando a vedere l'inizio della risposta del secondario per entrambi i fronti:

Tabella 1.4: Fasce della Dead-Zone

Dead-Zone Superiore	$\pm 210$ PWM
Dead-Zone Inferiore	$\pm 120$ PWM

# Capitolo 2

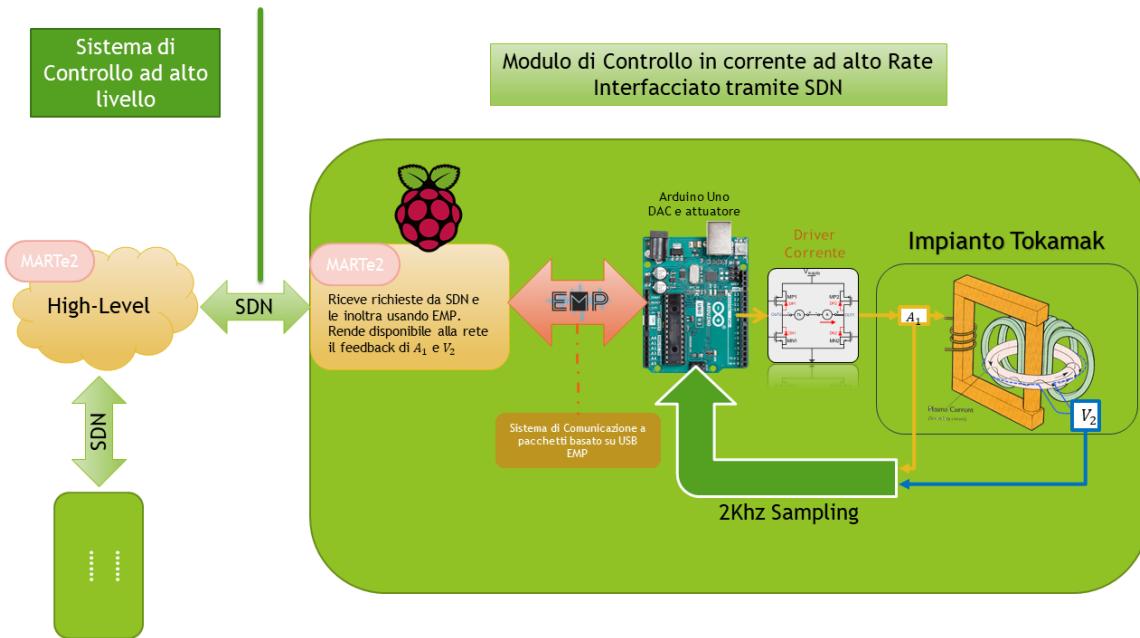
## Architettura di Sistema

In questo capitolo verranno affrontati gli aspetti progettuali e i problemi realizzativi per poter campionare l'esperimento e trasferire i dati campionati a un dispositivo esterno collegato alla scheda principale.

### 2.1 Architettura ad alto livello

Il progetto finale ha come obiettivo la realizzazione di un architettura di controllo per le bobine poloidali presenti nei reattori Tokamak.

Figura 2.1: Architettura di controllo



Lo schema proposto realizza l'obiettivo per una singola bobina, il progetto finale prevederà la ripetizione in serie del medesimo schema per il numero di bobine necessarie.

Dallo schema risulta evidente che tutti i componenti visti nel capitolo "[Elementi Costitutivi](#)" si relazionano con lo stesso  $\mu$ **Controllore**: l'**Arduino Uno**.

Figura 2.2: Scheda Arduino Uno



Per riportare i dati fuori e ricevere il riferimento da inseguire nella  $V_2$ , è stata realizzata dal sottoscritto la libreria [\*Embedded Message Pack\(EMP\)\*](#).

La libreria è scritta in C++ ed usa fortemente il concetto di classi template per permettere ai compilatori di ottimizzarla al massimo durante la compilazione della libreria. Tra le necessità a cui deve venire in contro la libreria troviamo prima fra tutte la necessità di poter essere compilata Cross-Platform, il ché ha portato a sviluppare il codice usando il minor numero possibile di librerie esterne, le quali solo davvero universali e alla base di qualunque Toolchain, e definire il resto al suo interno.

Il suo compito specifico, in questo progetto, è di mettere in comunicazione l'**Arduino Uno** con un nodo *MARTe2* installato su di una **Raspberry Pi**.

Quest'ultimo nodo ha il compito di mettere in rete il feedback dell'esperimento, e comunicare all'**Arduino Uno** eventuali cambio di riferimento. Questo ultimo tratto è realizzato mediante il protocollo **SDN**, che viaggia sopra Ethernet e dà garanzie Real-time.

Nella sua forma finale, il progetto prevede la riproduzione in serie di questo schema di controllo per arrivare a controllare tutte le bobine poloidali presenti in un tokamak.

## EMP - Libreria di Comunicazione Seriale (Embedded Message Pack)



**Embedded Message Pack(EMP)** nasce con l'obiettivo di standardizzare un protocollo di comunicazione tra 2 dispositivi, richiedendo all'utilizzatore della libreria di definire la struttura dei pacchetti che vuole trasferire, e demandando ricezione, trasmissione e verifica di integrità alla libreria.

La realizzazione della libreria è stata guidata dall'obiettivo di avere un'alta efficienza computazionale e un footprint di memoria uso minimo e allocabile in fase di compilazione, eliminando la necessità di memoria dinamica.

Lo scenario di utilizzo principale è il mettere in comunicazione 2 sistemi agli estremi di un link (rete Peer2Peer ) e non ha nessuna pretesa di networking, possibili link di comunicazione adatti sono: USB, UART, Bluetooth, moduli XBEE, etc...

Inoltre la libreria è in grado di aggiungere un layer software per la verifica di integrità, testata attraverso un codice *Checksum Calculation 8 Bit (CRC8)* aggiunto alla fine della comunicazione dal trasmettitore, e usato dal ricevitore per decidere se scartare o tenere il pacchetto ricevuto.

Il protocollo usato per codificare la comunicazione è *Consistent Overhead Byte Stuffing (COBS)*, il quale permette di raggiungere gli obiettivi di efficienza e rapidità computazionale e porta con sé la

possibilità di poter supportare altre features interessanti:

**Multiple-Package** Il protocollo di comunicazione usato (IEEE, *Consistent Overhead Byte Stuffing (COBS)*) permette di far gestire ad EMP il trasporto, attraverso lo stesso mezzo, di **pacchetti di tipologia e dimensione diversa** senza inviare più byte di quelli strettamente necessario.

⇒ Alta Efficienza

**Zero Tempo di negoziazione** Il protocollo di comunicazione usato (IEEE, *Consistent Overhead Byte Stuffing (COBS)*), rende EMP adatto ad un uso ‘Streaming’, questo perché non è necessario alcuna fase di sincronizzazione iniziale o durante la trasmissione in caso di perdita di dati, in aggiunta a ciò, EMP è in grado di scartare pacchetti errati in maniera trasparente all’utilizzatore. Tutto questo grazie al protocollo che **Auto-delimita i singoli pacchetti**.

⇒ Trasparenza Totale

Entrambe queste features aggiuntive sono presenti all’interno di *Embedded Message Pack(EMP)* e attraverso l’uso della libreria sfruttarle è davvero semplice, le uniche responsabilità a carico degli utilizzatori è la definizione dei pacchetti che sarà possibile scambiare in fase di compilazione del codice e il riempimento corretto dei pacchetti.

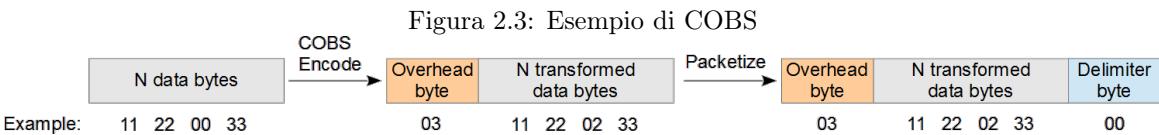
⇒ Semplicità d’uso

Vedremo ora di approfondire come avviene la codifica del pacchetto, così da capire come sia possibile realizzare queste funzionalità accessorie, per poi spostarci ad analizzare la struttura del codice della libreria e una rapida descrizione della direzione di sviluppo che si è presa.

## Consistent Overhead Byte Stuffing (COBS)

Il protocollo di comunicazione che permette l'invio di pacchetti diversi e senza fasi di negoziazione alla base della libreria è **COBS**(IEEE, *Consistent Overhead Byte Stuffing (COBS)*).

Si tratta di un algoritmo per la codifica di byte, progettato per essere al tempo stesso efficiente e non ambiguo, che permette la definizione di *data-pack frame* **Auto-delimiti**.



### 2.1.1 Metodo di codifica

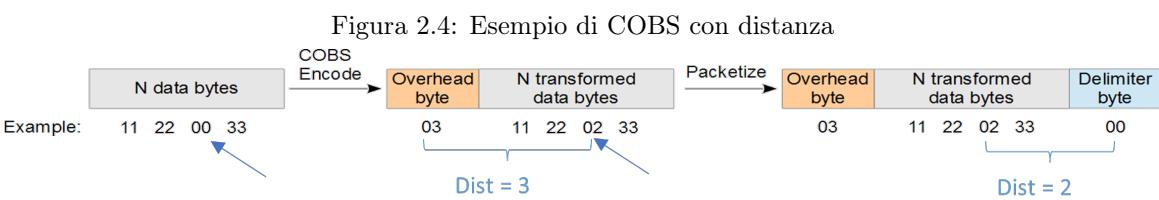
L'algoritmo di COBS trasforma una stringa arbitraria di byte, ciascuno dei quali ha un Range di valori da **[0:255]** in una nuova stringa di byte dove però ogni byte va da **[1:255]**. La dimensione della nuova stringa è sempre pari alla dimensione della precedente +1.

L'obiettivo di questo metodo di codifica è di eliminare tutti i possibili byte '\0' dal pacchetto in maniera reversibile.

Questo processo rende il carattere '**\0**' (byte zero) ottimo candidato per essere usato come terminatore di stringa (di byte) durante l'invio, rendendo un pacchetto COBS-Encoded mai ambiguo e sempre **Auto-delimitato**.

L'algoritmo di codifica consiste nel:

1. Inserire un byte '\0' all'inizio del pacchetto
  2. Individuare tutti gli altri byte '\0'
  3. Inserire un byte '\0' alla fine del pacchetto
  4. Sostituire tutti gli '\0' con la distanza dal successivo '\0' nella stringa, ignorando l'ultimo



Il protocollo COBS implementato per la realizzazione di questa libreria ha il limite di non poter codificare blocchi di byte che hanno una distanza tra 2 '\0' superiore a 255 byte, questo limite è potenzialmente rimovibile usando un algoritmo più sofisticato, ma renderebbe il codice inutilmente più complesso e pesante da gestire poiché obiettivo EMP non è trasmettere grandi byte in sequenza, per tale motivo tale feature non è stata implementata.

Il codice della codifica è reperibile nel repository di [Embedded Message Pack\(EMP\)](#) al path:

`EMP/02_SRC/EMPlibs/src/MPcore/cobs-c/`.

### 2.1.2 Caratteristiche chiave

Prima caratteristica vincente della libreria è il suo alto grado di adattabilità, essa infatti per poter funzionare richiede solo **2 informazioni critiche** (e altre di contorno per l'allocazione opportuna dei buffer), esse sono i tipi dei pacchetti in **Input** (*pIn*) e in **Output** (*pOut*) ovvero sia delle strutture in C, con i dati organizzati in base al messaggio da trasferire ([Esempio di definizione Pacchetto in EMP](#)).

In secondo luogo, la codifica *Consistent Overhead Byte Stuffing (COBS)*, che abbiamo appena visto permette di avere pacchetti **Auto-delimitati**, ciò permette quindi di scambiare pacchetti diversi tra loro (sia per tipologia che per lunghezza) lungo **lo stesso Stream** di dati.

L'unica condizione necessaria è che il destinatario sia capace di determinare la tipologia di contenuto trasportato nel pacchetto semplicemente leggendolo.

Questo può essere facilmente risolto in più modi:

**Lunghezza Univoca** Ogni possibile pacchetto ha una lunghezza diversa da tutti gli altri  
 $\Rightarrow$  La lunghezza implica il contenuto

**Aggiunta di un campo Tipologia** Aggiungendo all'inizio della trasmissione un *type byte*  
 $\Rightarrow$  I tipi vengono Preconcordati/Standardizzati

Il metodo più universale è sicuramente l'aggiunta di un campo fisso per il tipo, di cui un esempio è visibile nell'appendice al listato [8.12 \(Definizione Pacchetti Multipli\)](#).

In ogni caso, la codifica *Consistent Overhead Byte Stuffing (COBS)* aggiunge 2 byte extra al pacchetto che si vuole inviare, e tanto per la codifica quanto per la decodifica in ricezione, il **costo** è sempre pari a  **$O(n)$** .

L'aver usato *Consistent Overhead Byte Stuffing (COBS)* come sistema di codifica per la trasmissione, garantisce che la decodifica debba avvenire solo per byte compresi tra 2 zeri, e se questa decodifica presenta un errore, toglie ogni ambiguità sul da farsi. Il Pacchetto può essere solo scartato e si torna in attesa del successivo 0 mentre si memorizzano i byte ricevuti nel mentre.

#### Vantaggi:

1. Pacchetti **Self-Delimited**
2. Canale **Multi-Packet ready**
3. Protocollo **Senza Negoziazioni**
4. Responsabilità minime per l'utilizzatore
5. Prerequisiti implementativi minimale (mezzo di comunicazione *peer2peer* asincrono)

#### Svantaggi:

1. Aggiunge 2 byte fissi
2. Richiede  $O(n)$  elaborazione sia in codifica che decodifica

### 2.1.3 Integrità dei pacchetti

Per aumentare ulteriormente i campi d'uso e garantire un layer minimale di **integrità** sui pacchetti in transito, la libreria è in grado di include in maniera trasparente anche un check di errore calcolato usando *Crc8*, aggiunto in trasmissione e rimosso in ricezione. L'aggiunta e la verifica del CRC8 viene fatta sul pacchetto non ancora *COBS-Encodato*, ciò garantisce la possibilità di inviare il pacchetto a prescindere da quale sia il risultato del CRC8, e viene quindi verificato dopo aver de-*COBS-Encodato* il pacchetto in ricezione.

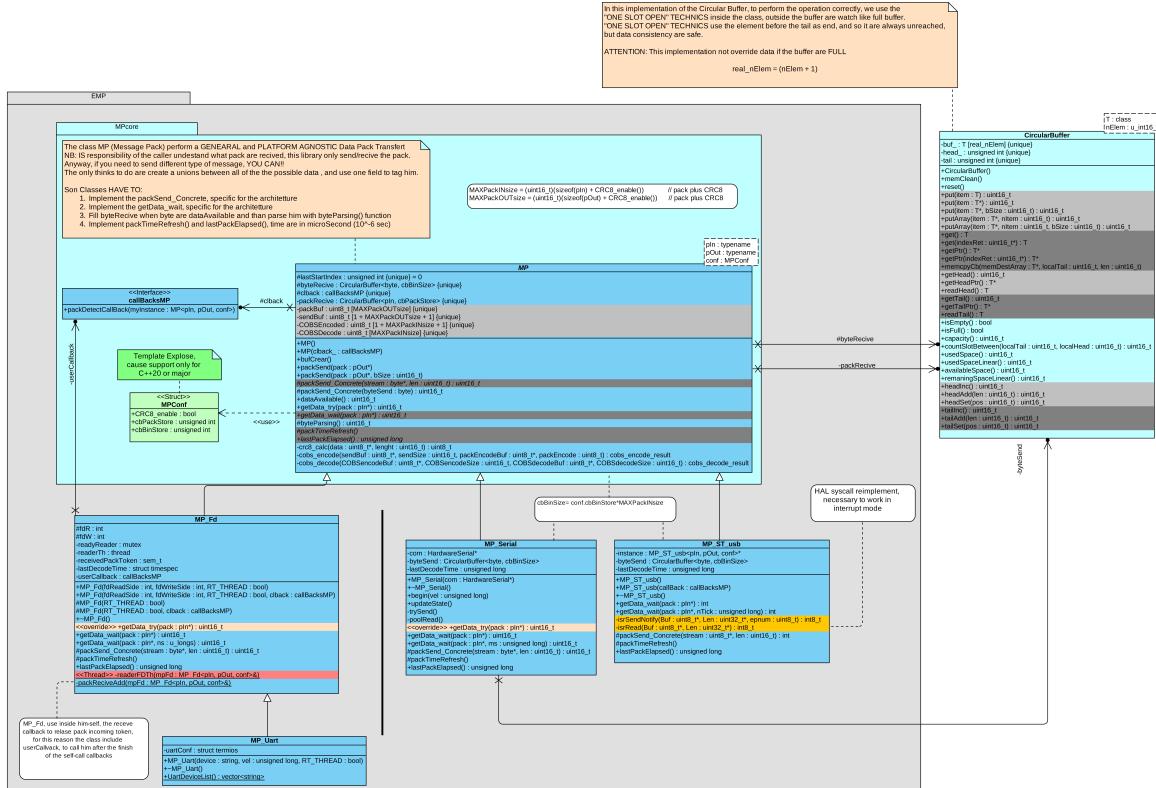
Questa features può essere agevolmente attiva o disattivata in fase di compilazione, ma necessita di essere attiva o disattiva contemporaneamente su entrambi i lati del link.

Se attiva essa è in grado di far capire se il pacchetto ha subito degli errori (ovviamente nei limiti del CRC8) e in tal caso scarta il pacchetto ricevuto in maniera totalmente trasparente all'utilizzatore che non ne viene notificato.

### 2.1.4 Struttura del codice

Lo sviluppo del codice è qui riassunto nel **Class Diagram** fatto in UML, del codice:

Figura 2.5: Class Diagram UML



Senza entrare eccessivamente nel dettaglio di Embedded Message Pack(EMP), essendo tutto reperibile nella versione più aggiornata all'interno del repository di [Embedded Message Pack\(EMP\)](#),

osserviamo che il codice è diviso in 2 macro blocchi (**MPCore**, **MP**) più una classe di supporto per il buffer circolare.

Questa organizzazione del codice è stata pensata per far compilare su tutte le piattaforme di interesse lo stesso *codice attivo* (codifica e decodifica dei pacchetti+accumulo), e demandare le particolarizzazioni dovute alle varie piattaforme o al mezzo di comunicazione usato nel caso specifico a delle classi figlie.

**MPCore** Il *Codice attivo* è presente all'interno del package **MPCore**. Tutto il codice contenuto in questo package è scritto in C++11 e per essere compilato necessita di un set minimale di librerie standard, sicuramente presenti in ogni piattaforma di sviluppo.

**EMP** Il package più generico comprende le classi figlie che concretizzano le operazioni di invio e ricezione, facendo poi elaborare i byte al codice che ereditano dalla classe **MP**.

Le classi sono scritte e pensate per funzionare su una piattaforma specifica, e su essa essere ottimizzate.

Se la piattaforma lo concede come nel caso di Linux, è quindi possibili fattorizzare ulteriormente delle funzionalità comuni e scrivere così, via via, sempre meno codice sicuri che quello in comune, se funziona su una classe, deve funzionare anche per l'altra.

**Buffer Circolare** La classe *CircularBuffer* è una classe di supporto che implementa un buffer circolare con logica "One Slot Open" (Johnston, [Creating a Circular Buffer in C and C++](#)) attraverso una classe template.

Il motivo di questa scelta, molto forte e vincolante, essendo principalmente lei la causa per cui tutte le altre sono anch'esse template, è dovuta alla possibilità di istanziare in fase di compilazione, tutta la memoria richiesta per il funzionamento del programma.

Una simile necessità nasce dal dover compilare la classe anche su schede embedded, le quali, notoriamente, non hanno a disposizione un heap in ram spazioso per la memoria dinamica, e beneficiano nelle prestazioni se in fase di compilazione gli indirizzi di memoria sono fissi.

### 2.1.5 Logica di Comunicazione

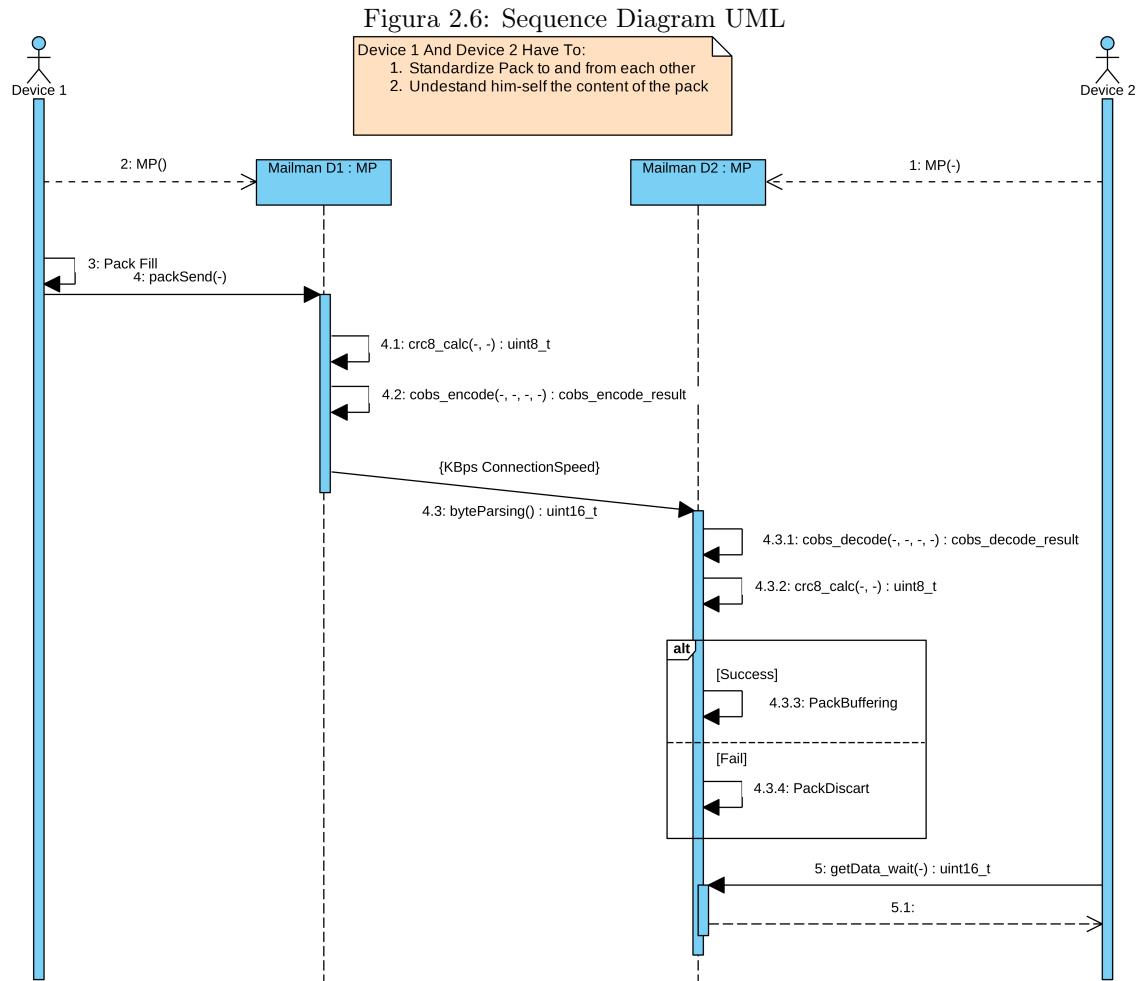
La libreria è pensata per automatizzare la trasmissione e la ricezione di 2 tipologie di pacchetti *Pre-concordati* tra 2 realizzazioni di **MP**, ovviamente non necessariamente sullo stesso dispositivo.

Come riportato in Appendice B ([7.3.1](#)), la definizione dei pacchetti è pensata per essere molto comoda e naturale. Inoltre usando un campo per distinguere il tipo di pacchetto e una `union` per unire in un'unica area di memoria pacchetti differenti, è anche possibile gestire la comunicazione di pacchetti multipli tra i 2 lati della comunicazione, basterà invertire l'ordine dei tipi tra le 2 classi ai 2 estremi della comunicazione.

Il riempimento corretto dei dati nel pacchetto, il calcolo della *size* reale di invio (per evitare sprechi) e il riconoscimento in ricezione del pacchetto trasmesso, è tutto a carico dell'utilizzatore della libreria, essa garantisce la corretta ricetrasmissione e di svegliare un ascoltatore al ricevimento di un pacchetto, qualunque sia la lunghezza ricevuta purché sia codificato correttamente, e in caso di CRC8, non presenti errori .

### 2.1.6 Code Flow

Vediamo ora come la libreria si frappone tra 2 device che vogliono comunicare mediante questo sequence diagram:



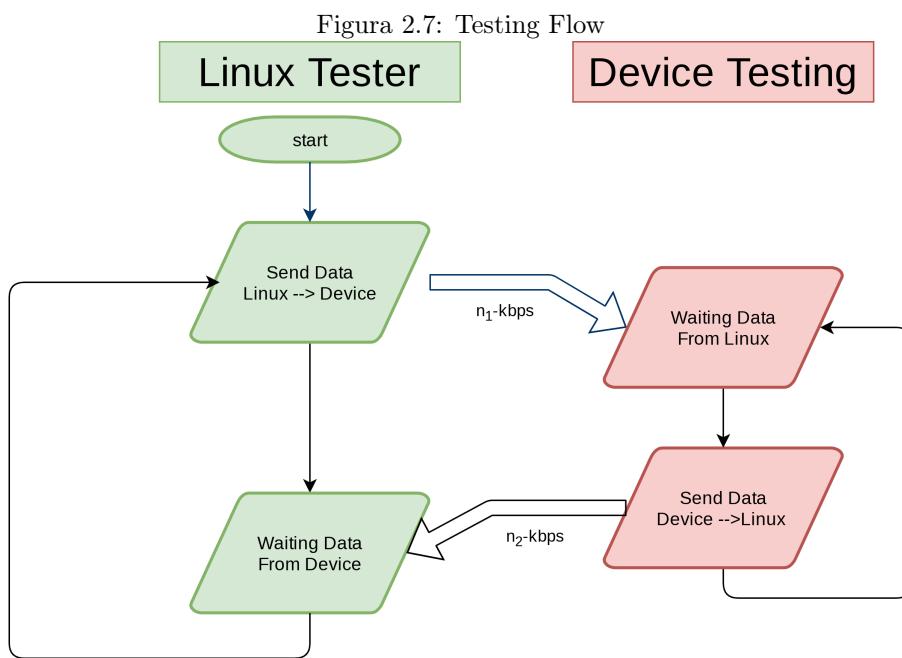
In questo esempio generico i 2 device non sono definiti, ovviamente nessuno dei 2 può istanziare concretamente una classe **MP** (essendo una classe virtuale), ma come detto prima, tutti i *Codici attivi* sono racchiusi lì dentro.

Come si può osservare, eccetto il riempire i dati, inviarli e attendere che arrivi qualcosa, per gli attori il lavoro finisce subito, internamente alla libreria, invece, a parti invertite, abbiamo il calcolo del CRC8 ([Checksum Calculation 8 Bit \(CRC8\)](#)) e la codifica usando COBS (IEEE, [Consistent](#)

*Overhead Byte Stuffing (COBS)*), e l'omologo dall'altro lato, dopo aver ricevuto i byte, procede alla de-codifica e check per l'integrità.

### 2.1.7 Test di Codifica/Decodifica su ogni Device

La serie di passi descritta nel [Code Flow](#) è stato testato su i vari dispositivi per cui la libreria è stata sviluppata usando il seguente schema:



I test vengono avviati da **Linux** e puntano a testare la perdita la correttezza della trasmissione usando Embedded Message Pack(EMP), e il funzionamento di Encoding e Decoding delle classi sulle entrambe le architetture.

Ad ora, sulle 3 Piattaforme di sviluppo (Linux, Arduino, STM32) i test sono stati un pieno successo.

## 2.2 Online Sampling

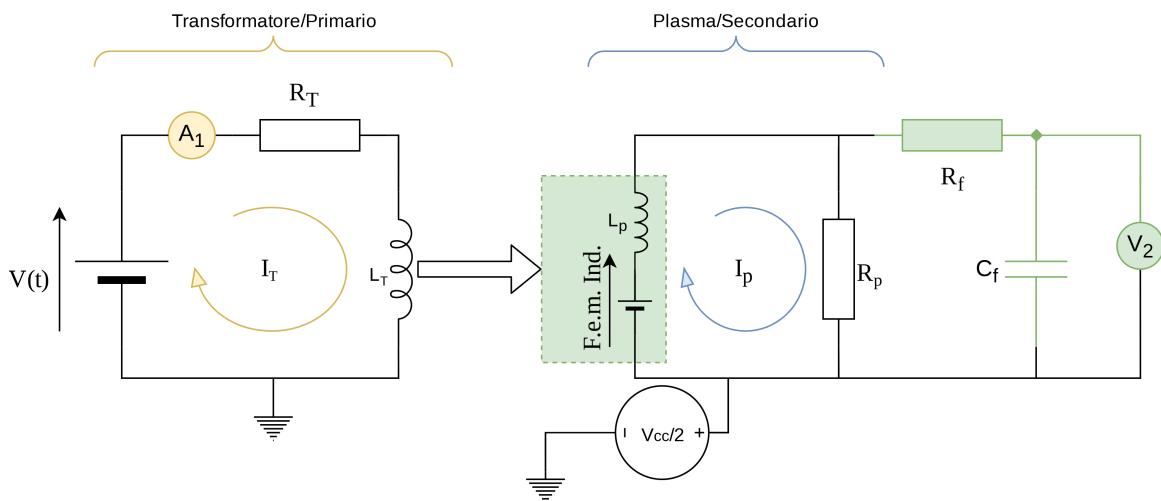
Come descritto in figura 2.1, il sistema controlla internamente la corrente, ma comunica con il mondo fuori l'attuale stato della bobina.

Per comunicare i Sample (e ricevere le Reference) è stata usata Embedded Message Pack(EMP)(Sezione 2.1).

Come visto nella sezione 'Misura del campo Elettrico del Plasma come indice per la Corrente', il circuito di misura è quello riportato in figura 1.1.6.

E, come per il Trasduttore di Corrente, in realtà anche il voltmetro  $V_2$  possiede un offset a  $\frac{V_{cc}}{2}$ , aggiunto per poter misurare tanto le correnti positive, quanto quelle negative.

Figura 2.8: Circuito reale con Misure



Controllo e misure avvengono alla massima frequenza che l'Arduino riesce effettivamente a gestire, ovvero 0.5ms (2Khz), nei quali campiona lo stato del sistema, attua il nuovo valore del PWM calcolato per il controllo  $V(t)$ , e invia i dati attraverso Embedded Message Pack(EMP).

### 2.2.1 Interconnessione $\mu$ Controllore $\Leftrightarrow$ Companion

Per raggiungere gli obiettivi descritti nella sezione dell'[Architettura ad alto livello](#), i seguenti pacchetti multipli sono stati concordati tra le 2 parti:

---

```

1 // #####
2 // ##### Companion to Arduino #####
3 // #####
4 struct newRef {
5     int16_t newRef;
6 } __attribute__((packed));
7
8 struct setUpPackAsk {
9     int8_t padding;
10} __attribute__((packed));
11
12 enum LinuxSendType : uint8_t { newRefType, askType };
13
14 struct _packLinux2Ard {
15     LinuxSendType type;
16     union {
17         struct newRef ref;
18         struct setUpPackAsk ask;
19     };
20} __attribute__((packed));
21typedef struct _packLinux2Ard packLinux2Ard;

```

---

Listing 2.1: Pacchetti Companion  $\Rightarrow$   $\mu$ Controllore

---

```

1 // #####
2 // ##### Arduino to Companion #####
3 // #####
4 struct sample {
5     int16_t pwm;
6     int16_t V2_read;
7     int16_t Isense_read;
8     int16_t err;
9 } __attribute__((packed));
10
11 struct setUpPack {
12     int16_t V2_mean;           // Adc read
13     int16_t Isense_mean;      // Adc read
14     int16_t dt;                // Time in us (10^-6)
15 } __attribute__((packed));
16 enum ardSendType : uint8_t { sampleType, setUpPackType };
17
18 struct _packArd2Linux {
19     ardSendType type;
20     union {
21         struct sample read;
22         struct setUpPack setUp;
23     };
24} __attribute__((packed));
25typedef struct _packArd2Linux packArd2Linux;

```

---

Listing 2.2: Pacchetti  $\mu$ Controllore  $\Rightarrow$  Companion

Essi permettono al Companion di conoscere tutto quello che sta succedendo nel  $\mu$ C, con un piccolo ritardo dovuto alla trasmissione ed eventuali ritardi interni (nel caso di Linux dovuti allo scheduler).

Le informazioni riguardanti offset e parametri dell'esperimento (`struct setUpPack`), sono raccolti a esperimento fermo, in particolare all'accensione della scheda nel [Setup del Controllore](#).

Successivamente la scheda evolve per tic di 0.5ms, dove nel tempo morto resta in ascolto di eventuali pacchetti di richiesta da parte del Companion all'interno del [Loop di Controllo](#).

### 2.2.2 Storage su file delle informazioni

Le informazioni ricevute dal Companion, vengono salvate all'interno di un file di testo contenente 2 tabelle, disposte una sotto l'altra.

La prima delle 2, tabula i dati del pacchetto `struct setUpPack`, il quale risulta utile per poter interpretare i dati successivamente.

Tabella 2.1: Salvataggio di 'struct setUpPack'

$V_{2_{mean}}$	$I_{sense_{mean}}$	dt
510	510	500

La seconda invece è lo streaming dei dati `raw`, ottenuti dalla scheda:

Tabella 2.2: Salvataggio di 'struct sample'  $\forall dt$

PWM	$V_{2_{read}}$	$I_{sense_{read}}$	e
0	509	510	1
0	509	511	1
...	...	...	...
0	509	510	59
44	510	510	36
48	518	510	28
53	514	510	32
59	513	510	33
...	...	...	...

Essi sono salvati sotto forma di testo ascii normale, separando i campi con un 'tab' (\t).

## 2.3 Post Elaborazione con Matlab

I dati salvati su Hard Disk, come visto della sezione [Storage su file delle informazioni](#), vengono presi in ingresso da Matlab e convertiti dai valori del DAC ai rispettivi fisici.

### 2.3.1 Conversioni Dati

Per ottenere la tensione reale letta il cambio è molto semplice:

$$V_{read} = ADC_{Read} \cdot V_{step} = ADC_{Read} \frac{V_{cc}}{2^{10} - 1} = ADC \cdot 4,887mV$$

Partendo da questa equivalenza, per la corrente del primario usiamo l'equazione [1.2.1](#), mentre la tensione sul secondario necessita solo della cancellazione dell'offset:

$$V_2 = V_{read} - V_{2_{offset}} \quad (2.3.1)$$

### 2.3.2 Filtraggio senza distorsioni di fase

Essendo i dati letti affetti naturalmente da rumore, essi vengono post-filtrati per rendere i dati più puliti e mettere in evidenza le tendenze del sistema. Questo filtraggio è stato realizzato usando un *Filtro digitale a senza distorsione di fase*(Matlab, [Zero-phase digital filtering](#)), come fa intuire il nome, la caratteristica di questo filtro è che non introduce nessun ritardo o anticipazione al segnale filtrato, permettendo di confrontarlo direttamente con i dati puri, eliminando rumori a bassa ed alta frequenza.

Questo filtraggio viene eseguito direttamente nell'importazione della tabella salvata con la struttura vista nella sezione [Storage su file delle informazioni](#), di cui il codice è in appendice [Parsing Tabelle](#).

## Capitolo 3

# Stima del modello del sistema

*In questo capitolo viene affrontato il problema della stima dei parametri del modello reale, in un equivalente lineare matematico, necessario per le simulazioni future e validare i risultati matematici precedenti.*

Partendo dall'esperimento con l'[Onda Trapezoidale Periodica \(RapidShot\)](#) per eccitare il sistema senza raggiungere la saturazione della tensione  $V_2$  (ricordiamo che in uscita abbiamo un derivatore filtrato, quindi ogni onda quadra genera automaticamente una forte derivata), si è puntato a ricavare un modello lineare prima della corrente in  $I_T$  e successivamente della tensione  $V_2$ .

Essendo il driver di corrente intrinsecamente non lineare, specie nei pressi della Dead-zone, il cui taglio si è visto non essere netto come si spererebbe, si è cercato di ottenere un buon fitting nei transitori del sistema, dove la dinamica è più lineare e "pulita".

Questa stima è ovviamente ~~semi~~-qualitativa (non troppo affidabile) e ha lo scopo di fornire un modello dell'impianto reale da usare in simulazione durante lo sviluppo del sistema di controllo, le ~~Non-Linearità~~ presenti vengono in questo modello ignorate, ma avendo dinamiche molto rapide, il controllo pensato per il modello lineare che stiamo per ricavare vedremo in seguito, continua ad essere valido anche nel caso reale ~~Non-Linearità~~.

Il modello stimato è per  $P_{pos}$  (eq 1.1.28), al fine di renderne la trattazione più semplice evitando di confondersi con i segni.

### 3.1 Metodo di stima automatico

Il metodo di stima automatico è basato sull'uso del *System Identification Toolbox* di Matlab, ed è usato allo scopo di ottenere una funzione di trasferimento SISO tra l'ingresso del Duty-Cycle (PWM) e la tensione sul secondario  $V_2$ .

Avendo a disposizione anche i dati della corrente sul primario, anche se poco sensibili, si è deciso di dividere la stima in 2 fasi per semplificare il lavoro al Toolbox: prima si è stimato il modello della **Corrente del Trasformatore** ( $I_1$ ), e a causa della sua scarsa sensibilità di misura (risultato 1.2.3) si è usato il segnale ricostruito come ingresso per la stima della dinamica della tensione sul secondario.

Il numero di *Poli* e *Zeri* di entrambe le funzioni di trasferimento sono state scelte partendo dall'analisi teorica descritta nella sezione [Modellazione Fisica](#), e il codice è presente in appendice a [Stima corrente Primario automatica](#).

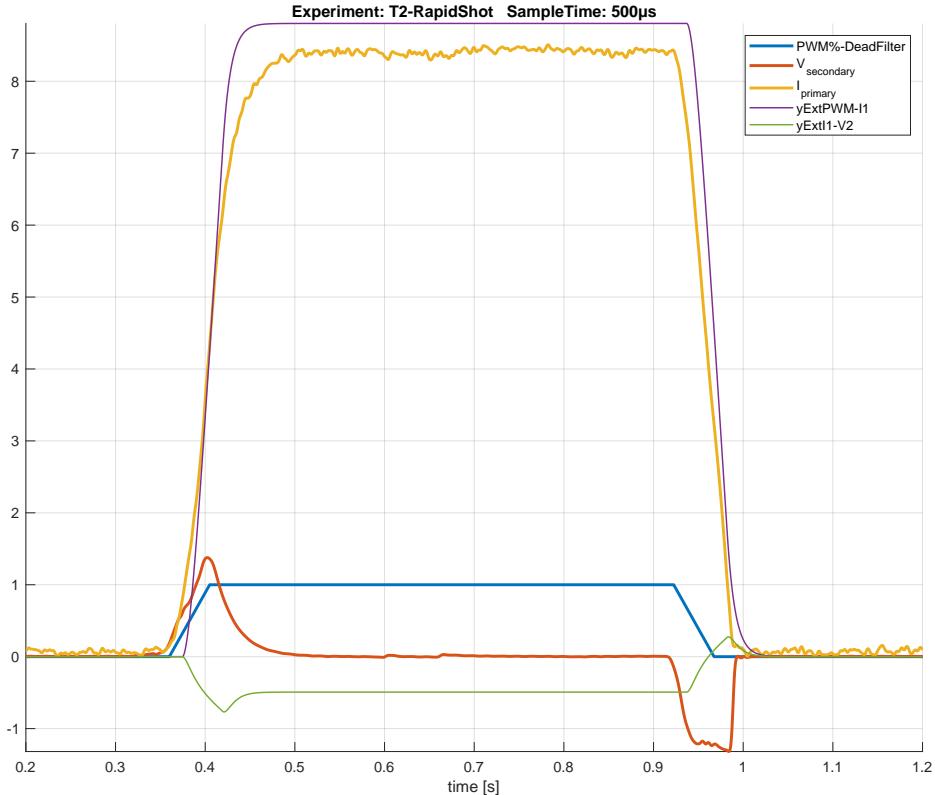
Tabella 3.1: Stime parametri con *System Identification Toolbox*

Funzione	Input	Output
$\hat{P}_{pwmI_1}(s) = \frac{970}{s+110}$	PWM	$I_1$
$\hat{P}_{I_1V_2}(s) = -\frac{0.44s+11}{s+200}$	$I_1$	$V_2$
$\hat{P}_{pwmV_2}(s) = -\frac{430s+11+4}{s^2+310s+26}$	PWM	$V_2$

Il risultato è che la stima del primario ha un aspetto simile a quello che ci aspettavamo, ma il secondario già sbaglia completamente aggiungendo un guadagno fisso nel numeratore che non dovrebbe esistere, e un segno '-' che non ha senso di essere rispetto ai dati usati per l'identificazione.

Di seguito la simulazione delle prime 2 funzioni di trasferimento (essendo la 3° la loro moltiplicazione ha poco senso mostrarla in simulazione sugli stessi dati).

Figura 3.1: Simulazione con stima automatica



Analizzando il grafico abbiamo che i primi 3 segnali (spessi), sono i dati reali dell'esperimento filtrati ([Filtraggio senza distorsioni di fase](#)), mentre le altre 2 linee rappresentano la simulazione usando la stima del Toolbox come modello.

Risulta facile vedere che la corrente del primario è accettabile anche se migliorabile, ma la funzione di trasferimento stimata per il secondario è completamente sbagliata, anche se dimensionalmente è simile.

Usando queste stime come base si sono trovati a mano dei coefficienti che meglio approssimano l'andamento delle curve.

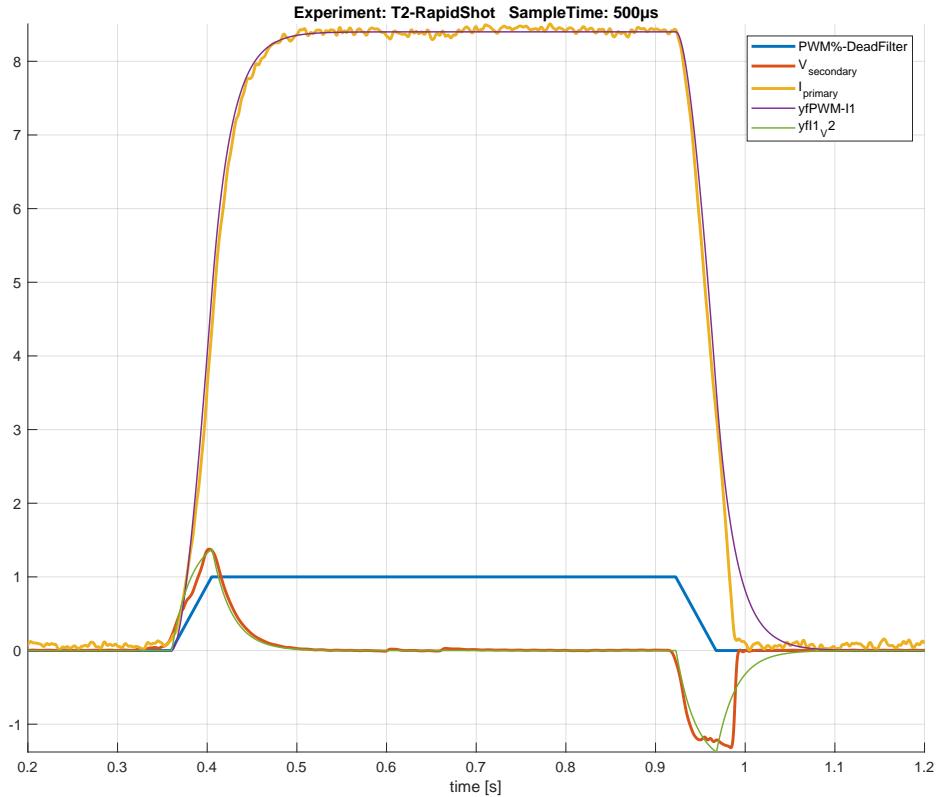
## 3.2 Tuning dei coefficienti

Partendo dai modelli generati da *System Identification Toolbox* e riportati in tabella 3.1, si sono 'limati' i dati a mano per migliorare la stima dei parametri, di seguito è riportata la tabella con i valori migliorati:

Tabella 3.2: Stime parametri tarati a mano

Funzione	Input	Input
$\tilde{P}_{p_{wm}I_1}(s) = \frac{8.4}{0.022s+1}$	PWM	$I_1$
$\tilde{P}_{I_1V_2}(s) = \frac{8.5 \times 10^{-3}s}{3.6 \times 10^{-4}s+1}$	$I_1$	$V_2$
$\tilde{P}_{p_{wm}V_2}(s) = \frac{9.1 \times 10^3 s}{s^2 + 2.8 \times 10^3 s + 1.3 \times 10^5}$	PWM	$V_2$

Figura 3.2: Simulazione con parametri tarati a mano



In particolare nella Dead-Zone inferiore il modello non risulta accurato, essendo predominanti le dinamiche non lineari, e ciò si vede particolarmente bene sul fronte di discesa del sistema, ma nel complesso la funzione trovata è una buona candidata per uno studio teorico e simulativo del sistema prima di passare alla fase implementativa reale.

### 3.3 Benchmark della stima

In questa sezione andiamo testare la qualità della stima ottenuta dando in ingresso al modello lo stesso input di un segnale eterogeneo con varie forme d'onda.

Metteremo quindi a confronto l'andamento reale con quello simulato preso in alcune frazioni interessanti.

Figura 3.3: Esperimento di verifica della stima 1

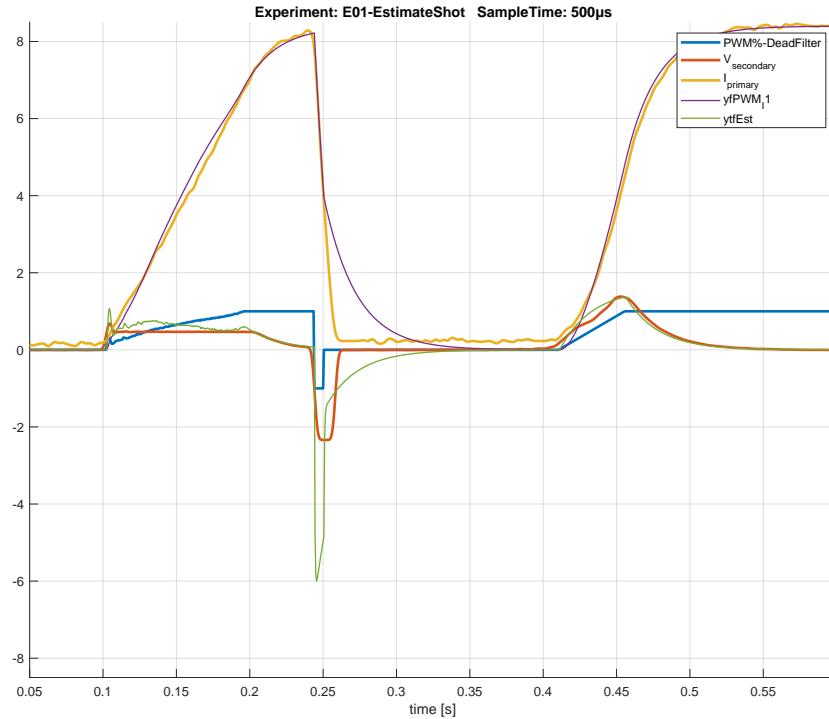


Figura 3.4: Esperimento di verifica della stima 2

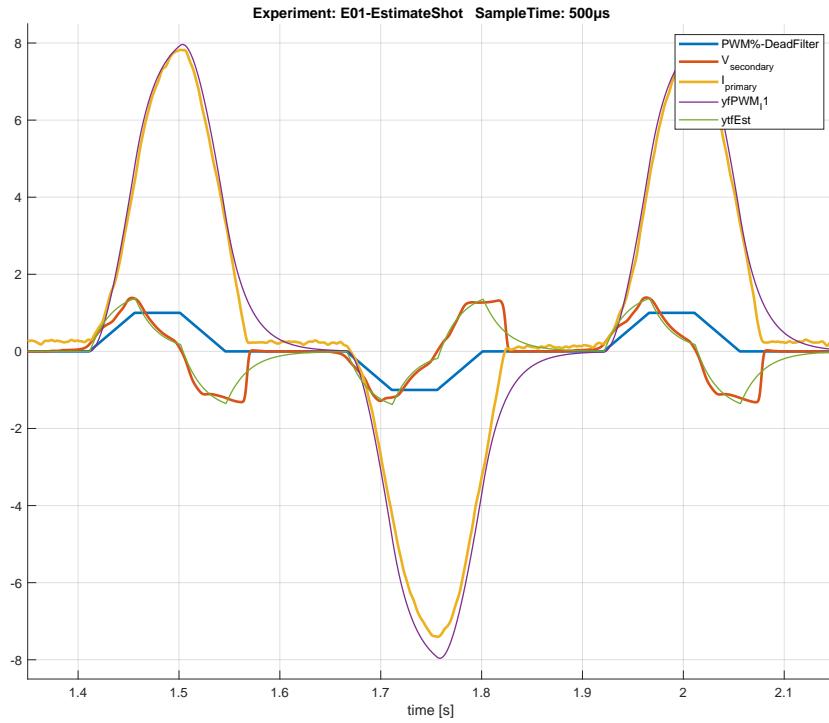
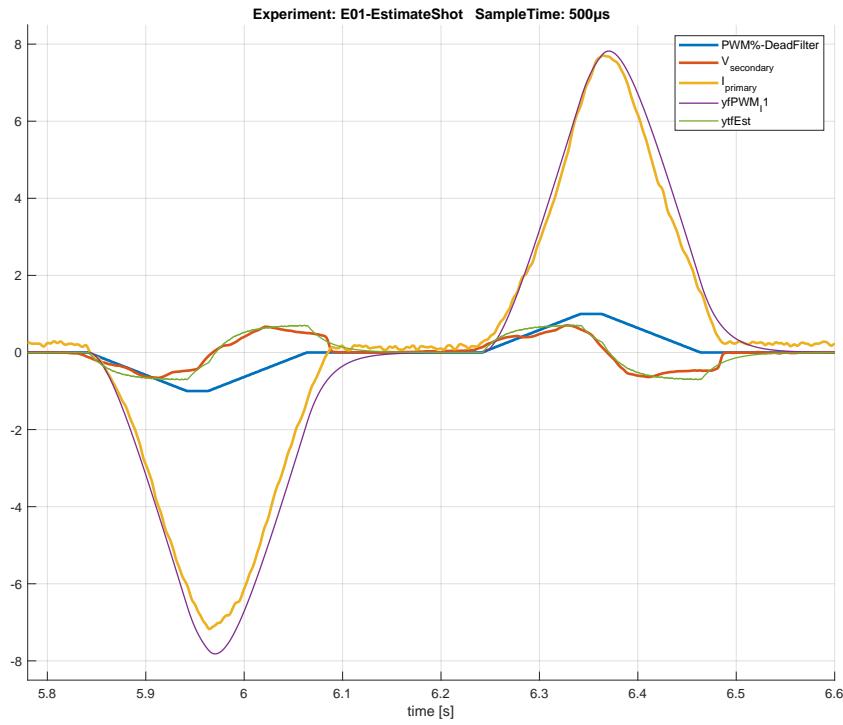


Figura 3.5: Esperimento di verifica della stima 3



Dall'analisi di questi grafici risulta chiaro che anche se il modello non è perfettamente allineato con le misure reali, a causa delle *Non-Linearità* del sistema originale che sono state trascurate nella creazione del modello, la dinamica simulata è rappresentativa dell'andamento reale del sistema complessivo, ed può quindi essere usata nello sviluppo teorico del controllore.

La funzione di trasferimento del sistema tra il segnale di PWM e arrivando alla tensione  $V_2$  è:

$$\tilde{P}_{p_{wm}V_2}(s) = \frac{9.1 \times 10^3 s}{s^2 + 2.8 \times 10^3 s + 1.3 \times 10^5} \quad (3.3.1)$$

Nel seguito della tesi, questa funzione di trasferimento, con questi coefficienti, verrà usata nelle simulazioni del controllore, e ci permetterà di avere un'idea qualitativa di come si comporterà il controllo una volta implementato nella realtà.

Come potevamo aspettarci dall'analisi teorica, i poli di  $\tilde{P}_{p_{wm}V_2}$  sono:

- $K_p \approx 9.1 \times 10^3$
- $z_1 = 0$  (dalla teoria del capitolo [Trasformatore, un Modello di Tokamak](#))
- $s_1 \approx -2752.77$
- $s_2 \approx -47.2251$

Il ché, come ci aspettavamo dalla teoria vista nella sezione '[Trasformatore, un Modello di Tokamak](#)', fa sì che il sistema sia Asintoticamente Stabile poiché i poli appartengono entrambi a  $\mathbb{C}^-$ , e nel caso particolare sono 2 poli semplici, il ché, anche se probabile, non era scontato.

## Capitolo 4

# Modello teorico di Controllo

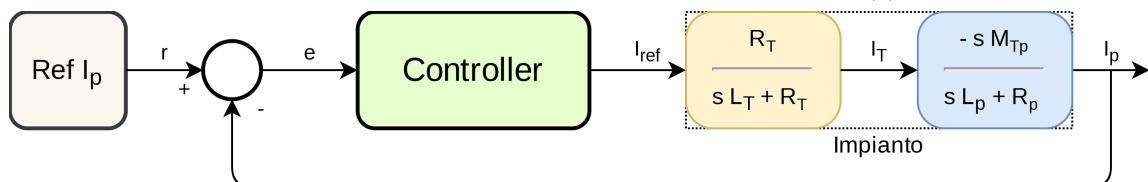
In questo capitolo viene affrontato il problema della creazione di un controllo lineare per l'impianto, che permetta di raggiungere un inseguimento a errore nullo per l'uscita.

### 4.1 Obiettivo di controllo

Come accennato nella sezione "[Misura del campo Elettrico del Plasma come indice per la Corrente](#)", attraverso il controllo e attuazione della corrente del Trasformatore, si punta controllare la corrente di Plasma, qui rappresentata caso dalla corrente sul Secondario del trasformatore, e come si è già fatto osservare nella medesima sezione, non essendo possibile misurare nella realtà la corrente di Plasma con metodi diretti, si usa come misura indiretta la  $V_{loop}$  ( $F_{em}$  nel nostro esperimento).

In questa tesi l'obiettivo di controllo è l'inseguimento a errore nullo del riferimento costante per la corrente di Plasma.

Figura 4.1: Sistema da controllare a blocchi con  $P(s)$



La misura a nostra disposizione è però la tensione letta dal voltmetro  $V_2$  ( $\Rightarrow F_{em}$  nel nostro caso,  $V_{loop}$  in un impianto reale).

Dall'equazione della dinamica del plasma 1.1.22 siamo in grado di ricavare che:

$$V_2 = I_p \cdot R_p = F_{em} - L_p \cdot \dot{I}_p$$

Dalla quale, trascurando la dinamica del filtro RC di misura (che comunque è  $\geq$  della frequenza di campionamento  $f_{tic}$ (2Khz) e di conseguenza ha una dinamica estremamente più rapida del segnale da misurare, quindi trascurabile), permette di ricavare, la funzione di trasferimento che lega l'ingresso  $I_{ref}$  all'uscita  $V_2$ <sup>1</sup>, ed essa risulta essere:

$$V_2(s) = I_p(s) \cdot -R_p \Rightarrow V_2(s) = P_{pos}(s) \cdot I_{ref}(s) \cdot R_p \quad (4.1.1)$$

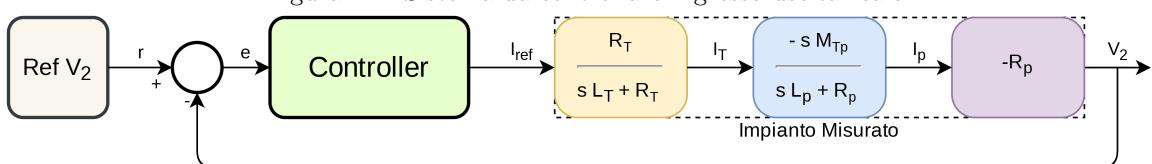
Da cui la funzione di trasferimento complessiva diventa:

$$\frac{V_2(s)}{I_{ref}(s)} = P_{pos}(s) \cdot R_p \quad (4.1.2)$$

E il riferimento di corrente di plasma, diventa un riferimento di tensione secondo l'equazione di conversione:

$$V_{2ref} = I_{p_{ref}} \cdot R_p \quad (4.1.3)$$

Figura 4.2: Sistema da controllare ingresso-uscita reale



<sup>1</sup>Nota bene, la  $V_2$  è misurata in realtà invertendo i poli del trasformatore, e quindi il segno di uscita, mettendoci di conseguenza nella situazione di avere  $P_{pos}$  come funzione di trasferimento

## 4.2 Teorema del valore iniziale e del valore finale

Prima di procedere con il calcolo del controllore per i nostri scopi, è bene ricordare il [Teorema del valore iniziale](#) e il [Teorema del valore finale](#) della Trasformata di Laplace ([«Trasformata di Laplace»](#)):

**Teorema 4.2.1** (Teorema del valore iniziale ).

*Se una funzione reale  $f$  ha trasformata razionale  $F(s)$  con grado del denominatore maggiore del grado del numeratore (vale comunque sotto ipotesi ancora più larghe , purché  $F$  sia non razionale e  $f(0^+)$  esista) allora:*

$$f(0^+) = \lim_{s \rightarrow \infty} s \cdot F(s) \quad (4.2.1)$$

■

**Teorema 4.2.2** (Teorema del valore finale ).

*Se una funzione reale  $f$  ha trasformata razionale  $F(s)$  con grado del denominatore maggiore del grado del numeratore e radici del denominatore (poli) nell'origine e o a parte reale negativa, allora:*

$$\lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot F(s) \quad (4.2.2)$$

■

Questi 2 Teoremi chiave, permettono di risolvere comodamente le equazioni differenziali, e quindi calcolare in maniera semplice il controllore che permette di ottenere gli obiettivi di controllo che ci si è prefissati di ottenere.

### 4.3 Controllo a errore nullo

Definiamo ora  $P_m(s)$  come l'impianto Reale misurato tra la corrente di riferimento  $I_{ref}$  del primario, e la tensione del campo elettrico  $V_2$  sul secondario.

$$P_m(s) = \frac{V_2(s)}{I_{ref}(s)} = \frac{sM_{Tp} \cdot R_p}{(sL_p + R_p)(sL_T + R_T)} = \frac{sM_{Tp} \cdot R_p}{s^2 L_p L_T + s(L_p R_T + L_T R_p) + R_p R_T} \quad (4.3.1)$$

Essendo il nostro obiettivo quello di portare  $e \rightarrow 0$  per  $t \rightarrow \infty$  con riferimenti  $r = K_r \in \mathbb{R}$ , usando la funzione sensitività  $W_{er}(s)$  e il [Teorema del valore finale](#) per inferire sull'evoluzione della dinamica di errore a *steady state*, progetteremo il controllore  $C(s)$  che permetta di realizzarne l'obiettivo  $e \rightarrow 0$ :

$$W_{er}(s) = \frac{e(s)}{r(s)} = \frac{1}{1 + P_m(s)C(s)}$$

**Sensitivity transfer function**  
(Carnevale, «Performances and robustness»)

$$r(t) = K_r \in \mathbb{R} \rightarrow r(s) = \frac{K_r}{s}$$

Trasformata di Laplace del riferimento

Da cui, applicando il [Teorema del valore finale](#) otteniamo:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot W_{er}(s) \cdot r(s) = s \cdot \frac{K_r / s}{1 + P_m(s)C(s)} \quad (4.3.2)$$

**Osservazione 4.3.1.** Al fine di semplificare i calcoli per la realizzazione del design del controllore, fattorizziamo ora  $P_m(s)$  e  $C(s)$  nella seguente forma polinomiale frazionaria, tralasciando così i dettagli dei termini non utili ai fini del design del controllore.

$$C(s) = K_c \cdot \frac{s^{\rho_{cn}} \cdot \prod_{i=1}^{\#Zeri \neq 0} \left( \frac{s}{z_i} + 1 \right)}{s^{\rho_{cd}} \cdot \prod_{i=1}^{\#Zeri \neq 0} \left( \frac{s}{p_i} + 1 \right)} = \frac{K_c}{s^{\rho_c}} \cdot \frac{C_n(s)}{C_d(s)}$$

- $K_c$  Guadagno statico Controllore.
- $C_n$  Polinomio numeratore senza Zeri in 0.
- $C_d$  Polinomio denominatore senza Poli 0.
- $\rho_c$  è il grado del polo in 0 ( $\rho_{cd} - \rho_{cn}$ ).

$$P(s) = K_p \cdot \frac{s^{\rho_{pn}} \cdot \prod_{i=1}^{\#Zeri \neq 0} \left( \frac{s}{z_i} + 1 \right)}{s^{\rho_{pd}} \cdot \prod_{i=1}^{\#Zeri \neq 0} \left( \frac{s}{p_i} + 1 \right)} = \frac{K_p}{s^{\rho_p}} \cdot \frac{P_n(s)}{P_d(s)}$$

- $K_p$  Guadagno statico Impianto.
- $P_n$  Polinomio numeratore senza Zeri in 0.
- $P_d$  Polinomio denominatore senza Poli 0.
- $\rho_p$  è il grado del polo in 0 ( $\rho_{pd} - \rho_{pn}$ ).



Usando la forma nell'osservazione 4.3.1 da questa forma, svolgiamo i calcoli dell'equazione 4.3.2:

$$1 + P_m(s)C(s) = 1 + \frac{K_c}{s^{\rho_c}} \frac{C_n}{C_d} \cdot \frac{K_p}{s^{\rho_p}} \frac{P_n}{P_d} = \frac{s^{\rho_c + \rho_p} C_d P_d + K_c K_p C_n P_n}{s^{\rho_c + \rho_p} C_d P_d} \quad (4.3.3)$$

Da cui otteniamo che:

$$s \cdot W_{er}(s) \cdot r(s) = s \cdot \frac{K_r / \$}{1 + P_m(s)C(s)} = K_r \cdot \left( \frac{s^{\rho_c + \rho_p} C_d P_d + K_c K_p C_n P_n}{s^{\rho_c + \rho_p} C_d P_d} \right)^{-1} \Rightarrow$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot W_{er}(s) \cdot r(s) = \lim_{s \rightarrow 0} K_r \cdot \frac{s^{\rho_c + \rho_p} \cdot C_d P_d}{s^{\rho_c + \rho_p} \cdot C_d P_d + K_c K_p C_n P_n}$$

Tenendo presente che  $C_d, P_d, C_n, P_n \rightarrow 1$  per  $s \rightarrow 0$ , poiché gli Zeri sono stati fattorizzati fuori assieme al guadagno Statico (vedi osservazione 4.3.1), abbiamo che gli esiti per l'errore a *Steady state* (Stato Stazionario) dipendono solo dal grado di  $s^\rho$  con  $\rho = \rho_c + \rho_p$  e  $\rho \in \mathbb{Z}$ :

$$e_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \begin{cases} 0 & \text{se } \rho \geq 1 \\ \frac{K_r}{K_c K_p} & \text{se } \rho = 0 \\ \infty & \text{se } \rho \leq 0 \end{cases} \quad (4.3.4)$$

Essendo  $\rho_p = -1$  a causa dello Zero nell'origine dovuto al Trasformatore, segue che il controllore dovrà necessariamente avere 2 poli nell'origine ( $\rho_c = 2$ ) per ottenere  $\rho = 1$ .

Da cui, il design base del controllore è:

$$C(s) = \frac{1}{s^2} \quad (4.3.5)$$

Questo controllore base è complicabile a piacere aggiungendo altri Poli e Zeri stabili, con l'obiettivo di migliorarne le performance della risposta del sistema.

**Osservazione 4.3.2.** Il controllore descritto in 4.3.5, anche se stabilizza il sistema e lo rende un inseguitore ad errore nullo, **non è stabile!** Esso infatti ha 2 poli in 0, rendendolo un polo non semplice e quindi causa di instabilità polinomiale.

L'uso di un simile controllore, anche se stabilizza l'uscita del sistema a ciclo chiuso, lo rende al contempo **Input to state instability**.

Questa conseguenza è inevitabile ma bene accetta poiché permette di inseguire con errore nullo, per la durata dell'esperimento, il riferimento, e la presenza di saturazione nell'attuazione evita il problema.

Bisognerà ovviamente tenerne conto in fase di realizzazione poiché con il procedere del tempo dell'esperimento, i numeri dello stato diventeranno sempre maggiori, e ciò potrà portare a problemi di overflow numerici che devono essere gestiti in fase di progettazione del codice.  $\checkmark$

La dinamica  $e_\infty$  riportata nel sistema 4.3.4 è valida  $\leftrightarrow$  il sistema a ciclo chiuso  $W_{V_2r}(s)$  risulta A.S.<sup>2</sup>, analizziamo quindi la sua stabilità attraverso la funzione di sensitività complementare:

$$W_{V_2r}(s) = \frac{V_2(s)}{r(s)} = \frac{P_m(s)C(s)}{1 + P_m(s)C(s)}$$

Complementary Sensitivity Transfer Function  
(Carnevale, «Performances and robustness»)

E la stabilità di questa funzione è data dai poli del suo denominatore, che abbiamo già calcolato nell'eq 4.3.3:

$$\text{Den}(W_{V_2r}) = s^{\rho_c + \rho_p} C_d P_d = s^\rho C_d P_d \quad (C_d(s) \text{ e } P_d(s) \text{ polinomi senza radici nell'origine } ^3)$$

Come visto nella teoria (vedi [Trasformatore, un Modello di Tokamak](#)) e nel modello stimato (Funx. Trasf. 3.3.1) sappiamo che  $P_d$  è composta da poli stabili nel semipiano  $\mathbb{C}^-$ , da cui segue che un qualunque insieme di poli stabili per il controllore ( $C_d$ ) non destabilizza il sistema e rende valida la dinamica  $e_\infty$  riportata nel sistema 4.3.4.

### 4.3.1 Design di controllore *PID-style*

In questa tesi la forma di controllore che si è scelto di usare è la seguente:

$$C(s) = \frac{K_2}{s^2} + \frac{K_1}{s} + K_p = \frac{K_2 + sK_1 + s^2K_p}{s^2} \quad (4.3.6)$$

La scelta è dovuta alla sua somiglianza con un più classico PID, che in questo caso non sarebbe bastato a raggiungere le specifiche (vedi [Controllo a errore nullo](#)), e come con lui, tramite un lavoro di *Tuning* dei coefficienti è possibile ottenere delle buone prestazioni per il sistema a ciclo chiuso. Ulteriore vantaggio di questa struttura è che permettere potenzialmente di creare un semplice controllo **Switching**, variando i coefficienti del numeratore, in base alla fase dell'esperimento.

---

<sup>2</sup>Asintoticamente Stabile

<sup>3</sup>Nota Bene:  $P_d$  e  $C_d$  sono il risultato della fattorizzazione vista sopra nell'osservazione 4.3.1, non possono quindi esserci poli nell'origine in questi 2 termini **per costruzione**

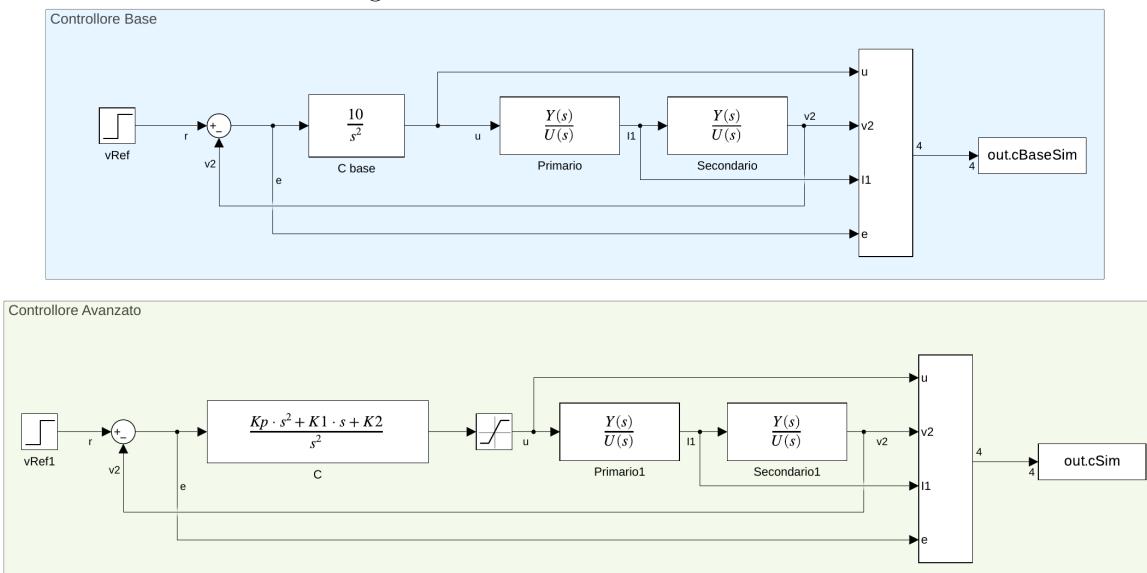
## 4.4 Simulazione Qualitativa su Simulink

Partendo dal modello stimato che si è ottenuto nel capitolo '[Stima del modello del sistema](#)' in cui si è giunti a stimare la Funzione di Trasferimento [3.3.1](#), puntiamo ora a testare il controllo base che abbiamo teorizzato e successivamente la sua evoluzione '*PID-style*'.

Mostreremo prima come si comporta il controllore base [4.3.5](#), e successivamente modificheremo i parametri (mettendo anche la saturazione per una maggiore aderenza ai dati reali) e mostreremo gli effetti qualitativi sul sistema quando i coefficienti sono presenti o meno e le loro variazioni.

Di seguito i 2 sistemi di controllo usati su Simulink per generare la simulazione:

Figura 4.3: Modelli simulati su Simulink



Il primo loop di controllo serve per avere una prova simulata a supporto della teoria e mostrare quindi l'andamento base del sistema.

Al contrario il secondo loop di controllo punta ad analizzare la risposta del sistema al variare dei coefficienti con lo scopo preciso di migliorarne le prestazioni.

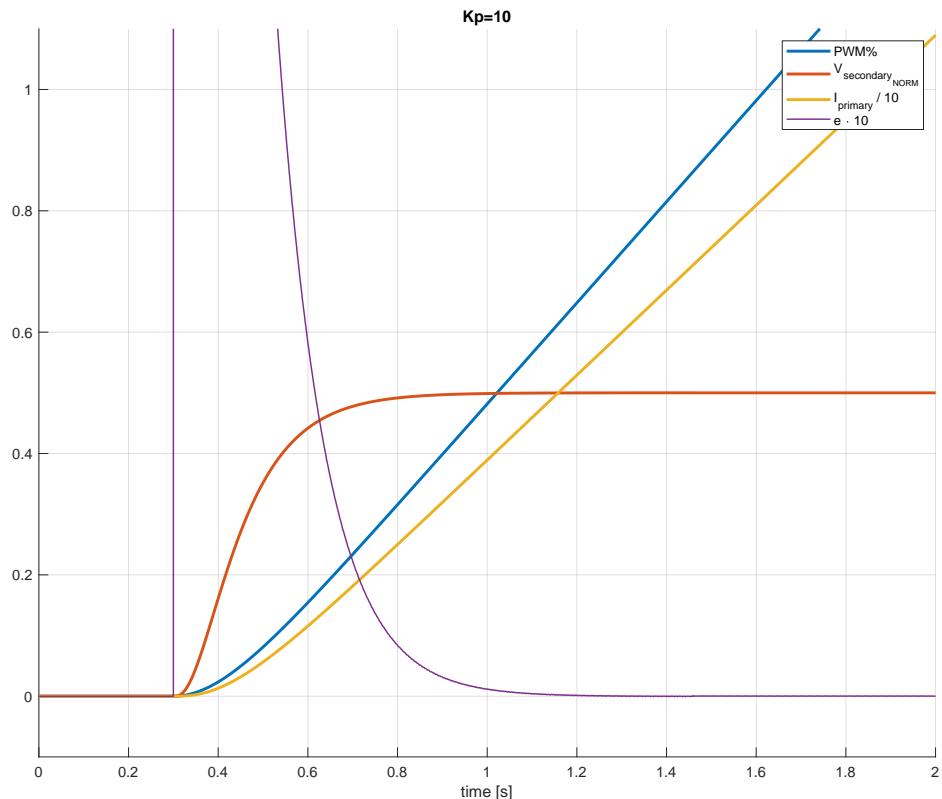
In entrambi i casi, la tensione  $V_{2ref} = 0.5V$

**NOTA BENE:** I grafici riportati hanno il segnale di errore zoomato di un fattore 10 per meglio mettere in evidenza il comportamento asintotico dell'errore  $e = V_{2ref} - V_2$

#### 4.4.1 Design Base di controllo

Usando il controllo base e senza saturazione, abbiamo una risposta che conferma i gli esiti calcolati per  $e_\infty$  nella sezione 4.3.4:

Figura 4.4: Modelli simulati su Simulink



Queste performance possono e devono essere ampliamene migliorate poiché raggiunta la saturazione del controllo, l'errore ricomincia subito a crescere ed è impossibile riprenderlo senza resettare l'esperimento.

In questo caso però la saturazione è stata eliminata al fine di mettere maggiormente in evidenza che asintoticamente il controllo proposto realizza le richieste di controllo di avere un inseguitore con errore nullo asintotico.

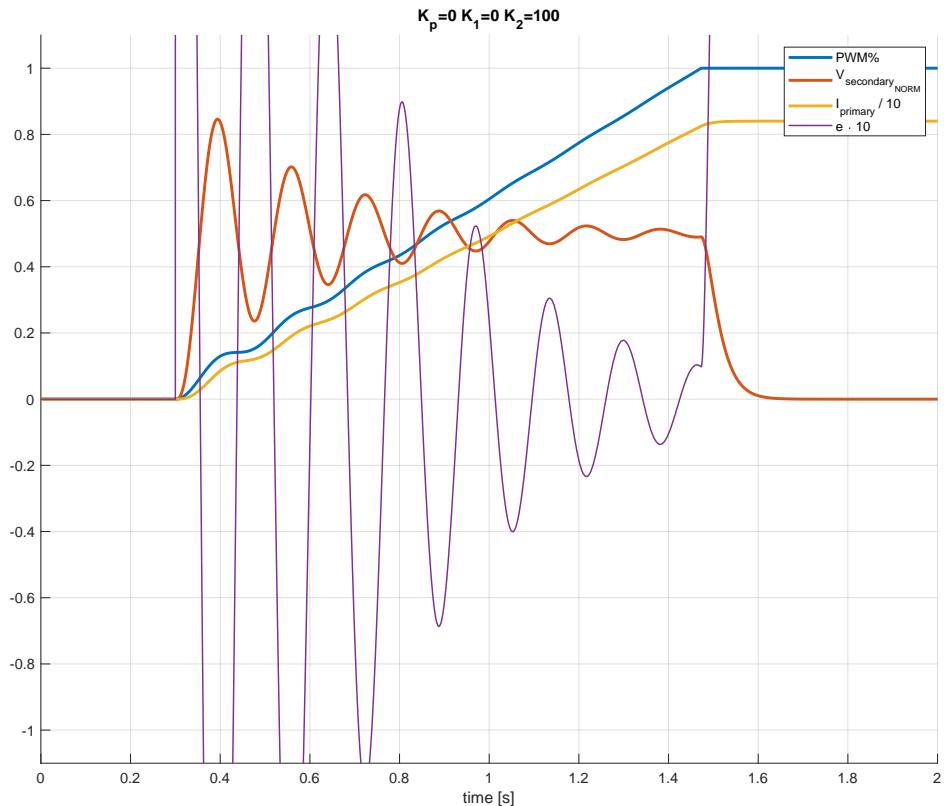
#### 4.4.2 Design Avanzato di controllo

Usando ora il controllore proposto nell'equazione 4.3.6 analizziamo ora gli effetti della presenza dei vari termini, e il loro effetto qualitativo sulla risposta e l'andamento dell'errore.

Ricordiamo nuovamente che il **segna<sup>le</sup> di errore è zoomato di un fattore 10** per meglio mettere in evidenza il comportamento dell'errore.

##### Analisi controllo Avanzato per $K_p=0 K_1=0 K_2=100$

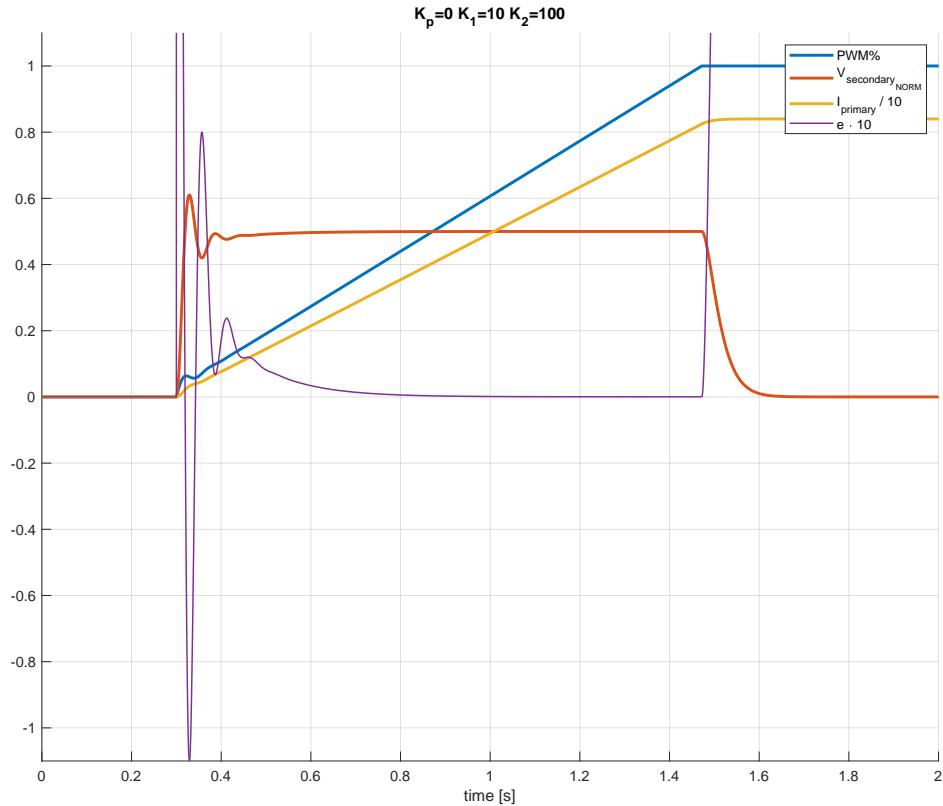
Figura 4.5: Controllo Avanzato  $K_p=0 K_1=0 K_2=100$



L'aumento del coefficiente per il doppio integratore ha l'effetto di creare risposte più tempestive, ma da atto a dei fenomeni oscillatori smorzati

##### Analisi controllo Avanzato per $K_p=0 K_1=10 K_2=100$

In questa seconda simulazione si è aggiunto un al controllore il termine integrale:

Figura 4.6: Controllo Avanzato  $K_p=0 K_1=10 K_2=100$ 

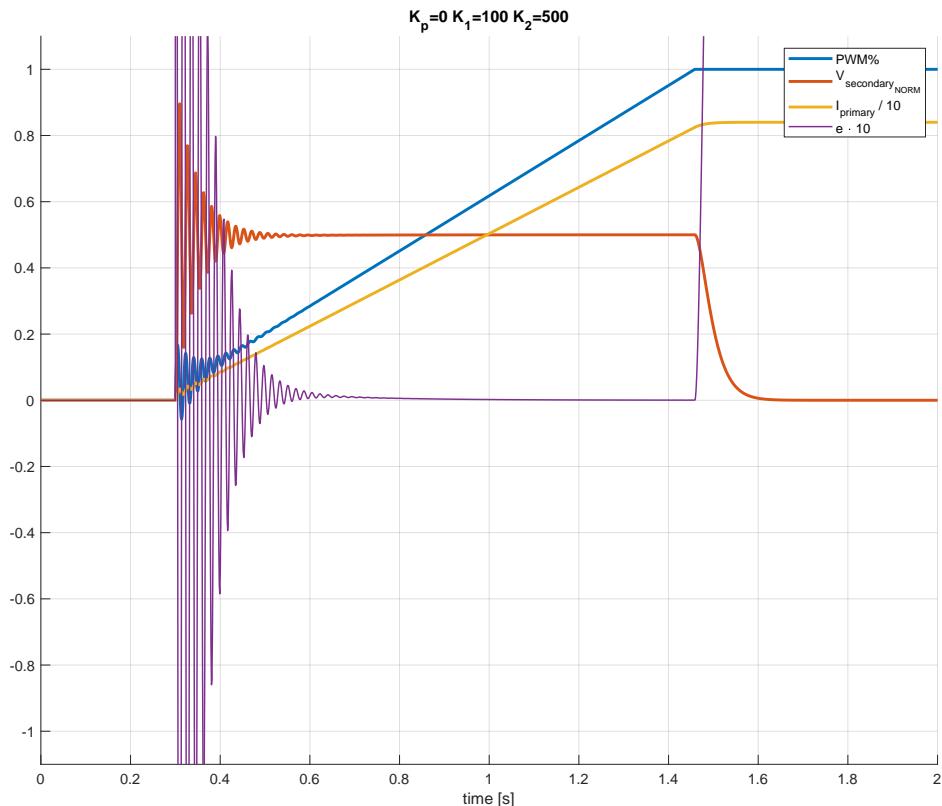
L'effetto del termine integrale è quindi smorzare il transitorio oscillatorio, per poi inseguire il riferimento con un andamento esponenziale.

In questo secondo esperimento abbiamo già migliorato molto le performance dal controllo base, avendo visibilmente migliorato il Tempo di assestamento del sistema e lasciando 600ms di esperimento con errore ampiamente trascurabile.

### Analisi controllo Avanzato per $K_p=0 K_1=100 K_2=500$

Abbiamo adesso aumentato i coefficienti del doppio e singolo integratore per vedere come migliorano le performance del sistema ad un loro aumento coordinato:

Figura 4.7: Controllo Avanzato  $K_p=0 K_1=100 K_2=500$

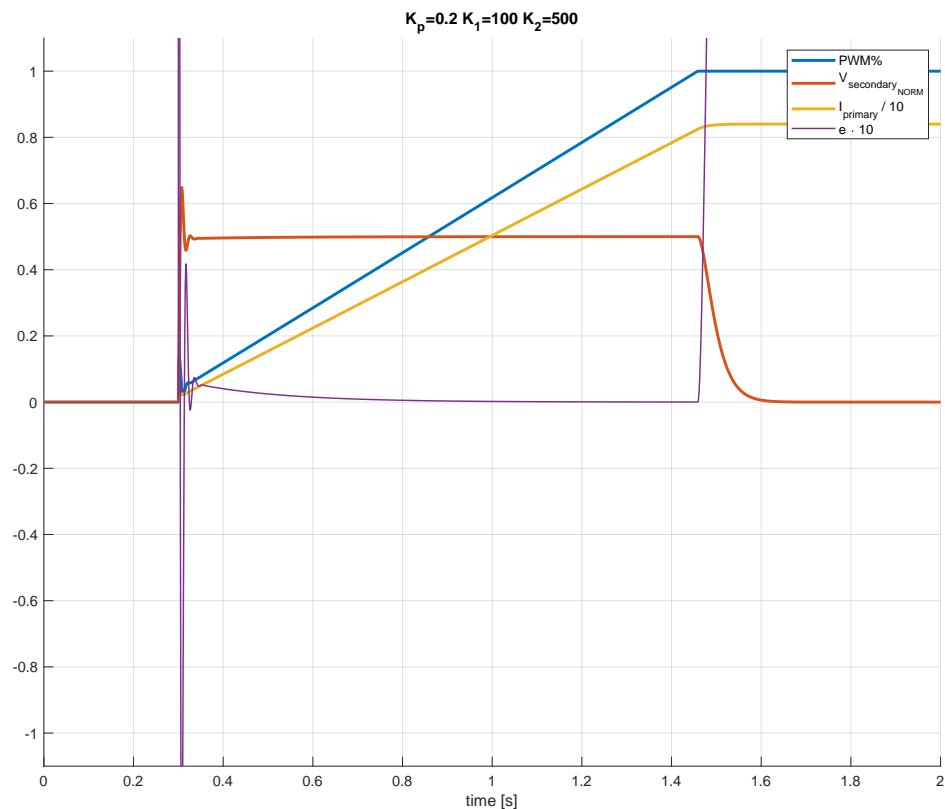


L'effetto è un ulteriore miglioramento sul Tempo di assestamento e una una discesa più pronunciata dell'errore verso lo 0, ma abbiamo pagato questo incremento prestazionale con il ritorno degli effetti oscillatori smorzati, ed essi sono anche a frequenze maggiori, non proprio desiderabile.

**Analisi controllo Avanzato per  $K_p=0.2$   $K_1=100$   $K_2=500$** 

Aggiungiamo quindi al caso precedente un termine proporzionale all'errore, così da rispondere subito alle variazioni del riferimento:

Figura 4.8: Controllo Avanzato  $K_p=0.2$   $K_1=100$   $K_2=500$

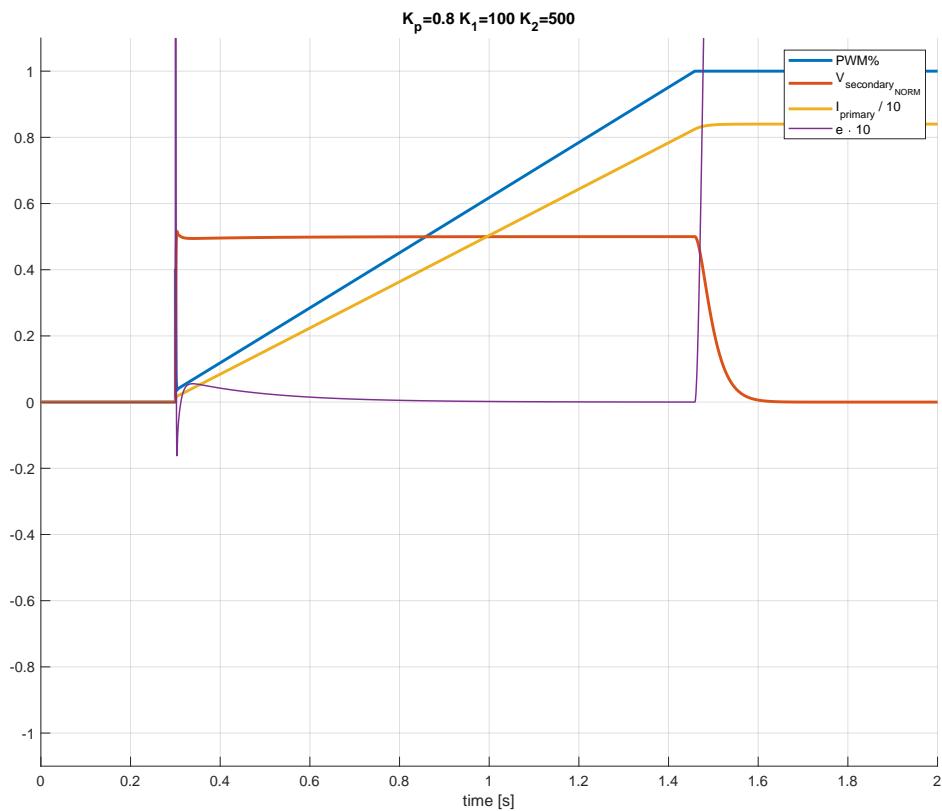


Essendo  $K_p$  istantaneo con la variazione del riferimento, abbiamo che l'inseguimento di  $V_{2ref}$  inizia prima, riducendo il margine di fase dovuto al caricamento degli integratori, ciò riduce il fenomeno di wind-up presente precedentemente e causa delle oscillazioni attorno al riferimento, e permette di tornare al comportamento del 2° esperimento, con performance nettamente superiori.

**Analisi controllo Avanzato per  $K_p=0.8$   $K_1=100$   $K_2=500$** 

In quest'ultimo esperimento analizziamo l'effetto dell'aumento del termine proporzionale sulla dinamica:

Figura 4.9: Controllo Avanzato  $K_p=0.8$   $K_1=100$   $K_2=500$



Rispetto al caso precedente, l'errore iniziale si è molto ridotto, passando da un fuori scala in entrambi i segni, a un errore di  $-0.019V$  di picco negativo (il picco positivo è per definizione  $0.5V$  essendo il riferimento dato come gradino).

Al contrario, superata questa prima fase, il resto della dinamica è fondamentalmente identica al caso precedente, indice che  $K_p$  serve solo per rispondere alle prime variazioni.

## 4.5 Conclusioni per il design Avanzato

In conclusione possiamo dire che il controllore "*PID-style*" definito nell'equazione 4.3.6 permette di ottenere gli obiettivi di controllo prefissati a prescindere dai coefficienti usati, e la possibilità di raggiungere delle performance di tutto rispetto ottimizzando opportunamente i coefficienti.

Qui di seguito una descrizione qualitativa degli effetti da aspettarsi con una loro variazione:

**$K_2$**  Influisce sulla velocità di convergenza a 0 dell'errore, ma il suo aumentare causa delle oscillazioni smorzate a frequenze tanto maggiori tanto maggiore è il coefficiente.

⇒ **Controlla la velocità di convergenza**

**$K_1$**  Se dimensionato opportunamente smorza le oscillazioni dovute a valori di  $K_2$  elevati, facendo tornare la risposta verso un andamento prevalentemente esponenziale.

⇒ **Migliora il Tempo di Assestamento**

**$K_p$**  Permette di migliorare le performance nei primi istanti di controllo quando avviene un cambio di riferimento, agendo molto prima che gli integratori possano arrivare a convergenza.

⇒ **Miglioramento del Tempo di Risposta**

I valori dei coefficienti visti in simulazione e calcolati sul modello però non possono essere implementati 1:1 nel caso reale, a causa delle *Non-Linearità* che sono state trascurate nella creazione del modello, uniti ai problemi dovuti al tempo di campionamento e attuazione del sistema che è pari a  $2Khz$ , i quali se scelti troppo elevati portano a fastidiosi effetti oscillatori attorno l'errore nullo.

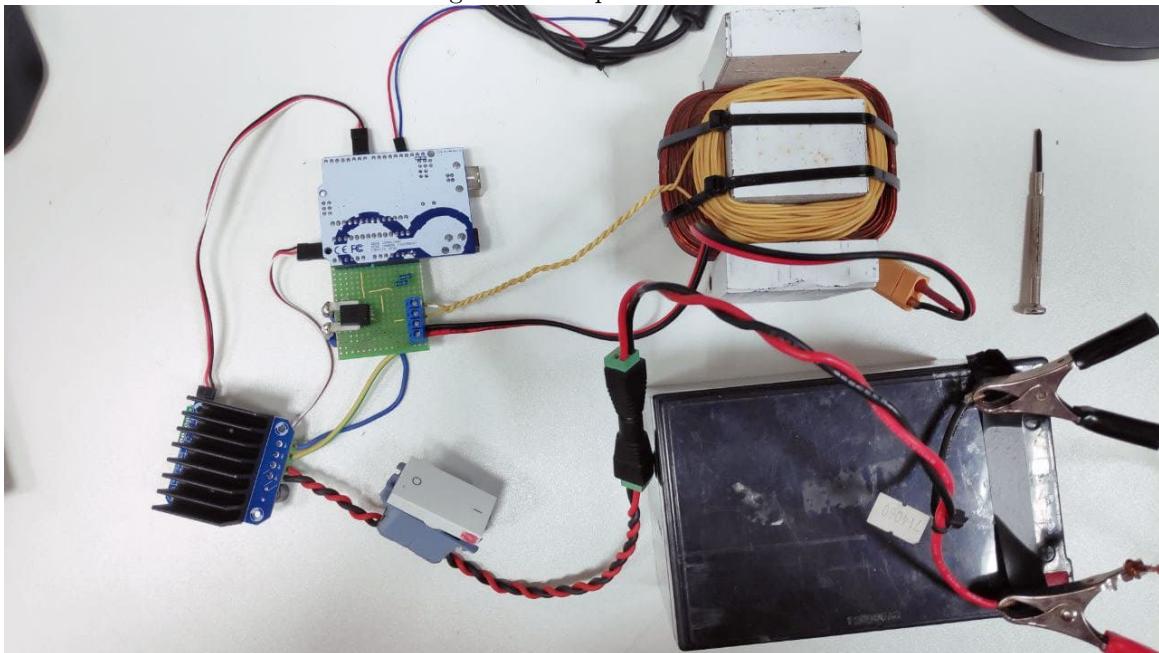
Non di meno, le osservazioni qui riportate continuano ad essere valide anche sul sistema reale, ed essendo le *Non-Linearità* presenti soprattutto nei pressi della *Dead-zone* e della *Saturazione* e di bassa intensità, essi possono essere modellati come del disturbo non troppo ampio, e si vede dagli esperimenti reali che il controllore così progettato è anche robusto per questo tipo di errori di attuazione.

## Capitolo 5

# Sviluppo Controllo reale

In questo capitolo vedremo come implementare nella realtà il controllore che abbiamo teorizzato all'interno del  **$\mu$ Controllore**, tareremo i suoi coefficienti e mostreremo come si comporta in un esperimento reale con tutti i problemi ad esso connessi (Non-Linearità del [BTS7960 High Current 43A H-Bridge Motor Driver](#), errori di quantizzazione, discretizzazione del controllo, ecc...)

Figura 5.1: Impianto Reale



Essendo un  **$\mu$ Controllore** un computer non eccessivamente potente, è necessario realizzare la funzione di trasferimento del controllo (equazione 4.3.6) mediante un sistema a tempo discreto.

Per semplificarcì l'implementazione, invece di creare un unico sistema del 2° ordine, si è optato per sommare tra loro le tre funzioni di trasferimento base che lo compongono.

Questa scelta è stata presa al fine di semplificare il debugging e permettere un più semplice controllo sullo stato dei sistemi dinamici, possibilità utile nell'ottica di voler saturare gli stati dei singoli integratori una volta che l'uscita ha superato la soglia di attuabilità (*Saturazione*).

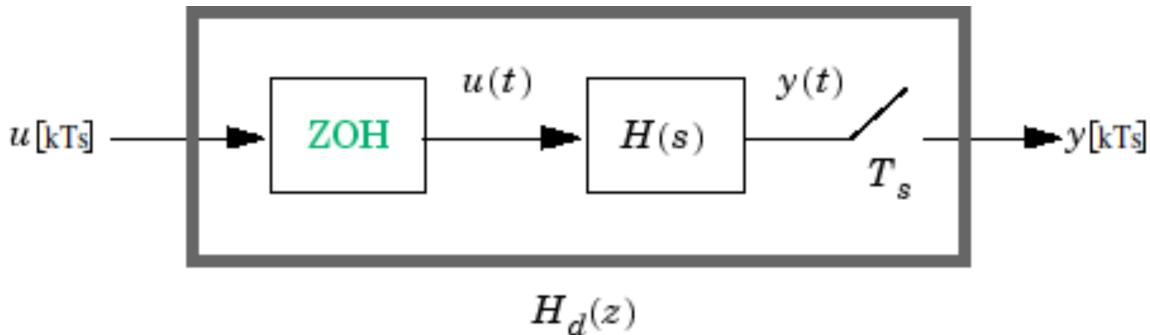
In fine, essendo l'obiettivo di controllo realizzato da una rampa, dopo un certo tempo in saturazione, per evitare lo spreco di energia da parte della batteria che alimenta il sistema, il codice ha implementato al suo interno un *Safe-Shutdown* che spegne il Ponte-H e resetta tutti gli stati del controllore, oltre che riportare il riferimento da inseguire a 0.

Questo stato non è permanente ma persiste fino all'arrivo di un nuovo riferimento da parte del companion esterno, qui simulato dal programma linux *MARTE2Moc*, che comunica con il  **$\mu$ Controllore** attraverso *Embedded Message Pack(EMP)*.

## 5.1 Discretizzazione Zero-Order Hold (Z.O.H.)

Un oggetto del tipo **Zero-Order Hold** (Z.O.H.) altro non è che un convertitore Digitale→Analogico che permette di interfacciare dei segnali **Tempo Discreto**  $\mathbb{T} = \mathbb{Z}$  che evolvono  $\forall \Delta T_s$ <sup>1</sup> con sistemi dinamici **Tempo Continuo**  $\mathbb{T} = \mathbb{R}$ .

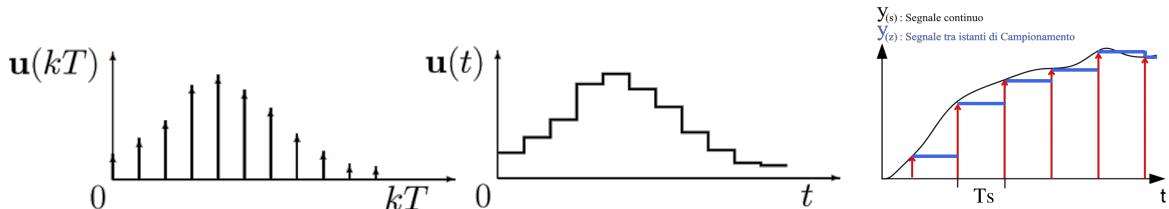
Figura 5.2: Discretizzazione ZOH  $H_d(z)$  per il sistema Tempo continuo  $H(s)$



Questa interconnessione "congela" l'ultimo segnale discreto  $u(kT_s)$  ricevuto e lo ripropone come un segnale costante in ingresso al sistema continuo che evolve in maniera indipendente.

L'uscita  $y(kT_s)$  è la discretizzazione di  $y(t)$ , campionata ogni  $T_s$ .

Figura 5.3: Segnali discretizzati con il metodo Zero-Order Hold



Il sistema  $H(s)$  durante gli intervalli  $T_s$  evolve avendo una costante in ingresso, e al successivo istante di campionamento l'uscita raggiunta viene campionata e mantenuta per ul successivo  $T_s$ , e questo procedimento all'infinito.

<sup>1</sup> $T_s$  = Sampling Time

Ora che abbiamo descritto qualitativamente cosa avviene usando una discretizzazione ZOH, vediamo ora come diventa  $H_d(s)$  nello spazio di stato in termini matematici. Il procedimento di discretizzazione necessita di passare attraverso lo spazio di stato dei 3 sistemi dinamici che compongono il controllore 4.3.6 e usando le formule del professore Zanasi, «[Discretizzazione di un sistema tempo continuo](#)», si ottengono i risultati seguenti risultati:

Tabella 5.1: Funzioni di trasferimento nello spazio di Stato, da  $\mathbb{T} = \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{T} = \mathbb{Z}$ 

$C_{I^2}(s) = \frac{K_2}{s^2}$ $\begin{cases} \dot{x} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}x + \begin{pmatrix} 0 \\ K_2 \end{pmatrix}u \\ y = \begin{pmatrix} 1 & 0 \end{pmatrix}x \end{cases}$	$C_I(s) = \frac{K_1}{s}$ $\begin{cases} \dot{x} = x + K_1 \cdot u \\ y = x \end{cases}$	$C_p(s) = K_p$ $\begin{cases} y = K_p \cdot u \end{cases}$
$\begin{cases} x^+ = \begin{pmatrix} 1 & T_s \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot x_k + K_2 \begin{pmatrix} T_s^2/2 \\ T_s \end{pmatrix} u_k \\ y_k = (1 \ 0) \cdot x_k \end{cases}$ $C_{I^2}(z) _{T_s} = K_2 \cdot \frac{T_s}{2} \cdot \frac{z+1}{(z-1)^2}$	$\begin{cases} x^+ = x_k + K_1 T_s \cdot u_k \\ y_k = x_k \end{cases}$ $C_I(z) _{T_s} = \frac{K_1 T_s}{z-1}$	$\begin{cases} y_k = K_p \cdot u_k \end{cases}$ $C_p(z) _{T_s} = K_p$

Si può notare che in tutti e 3 i sistemi si è scelta una realizzazione della funzione di trasferimento nello Spazio di Stato tempo continuo in *Forma Compagna di Osservabilità* (Zanasi, «[Forme Canoniche Spazio di Stato](#)»).

Questa scelta non è stata casuale e ha lo scopo di semplificare in futuro la codifica per un sistema di controllo **Switching nei Coefficienti**, volto a migliorarne ulteriormente le prestazioni, senza dover scalare lo stato in base al cambio dei coefficienti.

Questa comoda proprietà è dovuta alla struttura della matrice  $C$ , la quale, per variazioni **istantanee** dei coefficienti  $K_2, K_1, K_p$ , non propaga gli effetti sull'uscita  $y(t)$ , l'effetto della variazione arriverà in un secondo momento grazie all'integrazione dello stato, che ovviamente evolverà diversamente da prima a causa delle variazioni dei coefficienti. Per avere un'idea qualitativa degli effetti dei coefficienti

sul sistema complessivo, rifarsi alla sezione "[Conclusioni per il design Avanzato](#)".

I calcoli della trasformata Zeta, sono presenti solo per completezza e sono stati ottenuti usando la classica formula:

$$G(z) = C_d (zI - A_d)^{-1} B_d + D_d$$

Per i nostri scopi noi siamo interessati alle matrici  $A_d, B_d, C_d, D_d$  della conversione, così da implementare esattamente la discretizzazione di ordine Zero del sistema dinamico.

## 5.2 Codifica del controllore

La codifica del controllore [4.3.6](#) avviene attraverso le matrici  $A_d, B_d, C_d, D_d$  riportate in tabella [5.1](#), con queste matrici è stato costruito la classe di controllo `iiCTRL` riportata in appendice nel codice del controllore ([Header Classe controllore C\(s\)](#) e [Source Classe controllore C\(s\)](#)).

La classe viene chiamata all'interno del `Loop di Controllo` ogni istante di campionamento, e permette la modifica a richiesta del riferimento da inseguire.

All'interno della classe è già codificata una la logica di *Safe-Shutdown*, essa viene attivata quando il controllo ha raggiunto la saturazione per un tempo superiore ai 200ms, risulta infatti rischioso e dispendioso tenere connesso il trasformatore, poiché le correnti che scorrono sono dell'ordine dei 10A, e in ogni caso raggiungere gli obiettivi di controllo necessita di una rampa di corrente sul primario, che non si può ottenere se si è già saturato.

Questo contatore viene ripristinato a 0 all'arrivo di un nuovo riferimento da inseguire, causando di fatto il ripristino dell'esperimento.

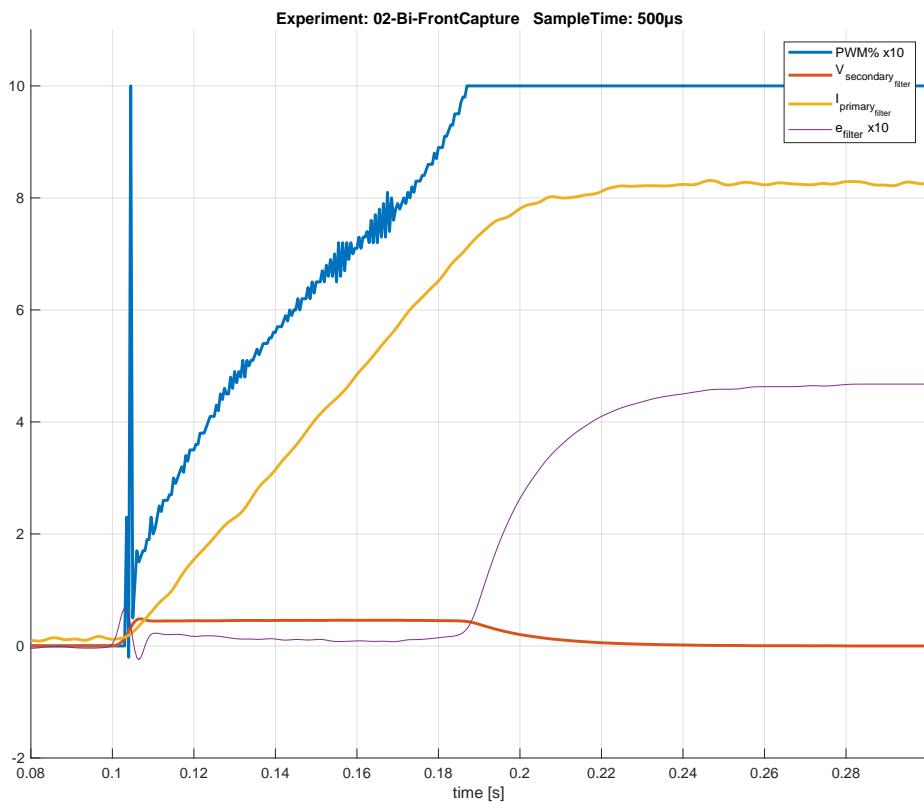
## 5.3 Esperimenti

Di seguito vengono riportati diversi spari catturati dal sistema in funzione, nella sua interezza, usando al posto di *MARTE2*, un programma scritto in C++ per Linux chiamato *MARTE2Moc*, quando il resto del sistema verrà controllato, gli stessi input di comando inviati da questa imitazione saranno ricevuti dal  $\mu$ **Controllore** e attuati in maniera identica.

### 5.3.1 Inseguimento singolo

In questo "sparo" viene impostato il riferimento a  $V_{2ref} = 0.5V$  e il controllo insegue prontamente il riferimento, mantenendo l'errore entro margini molto stretti e con una decrescita esponenziale.

Figura 5.4: Esperimento singolo  $V_{2ref} = 0.5V$

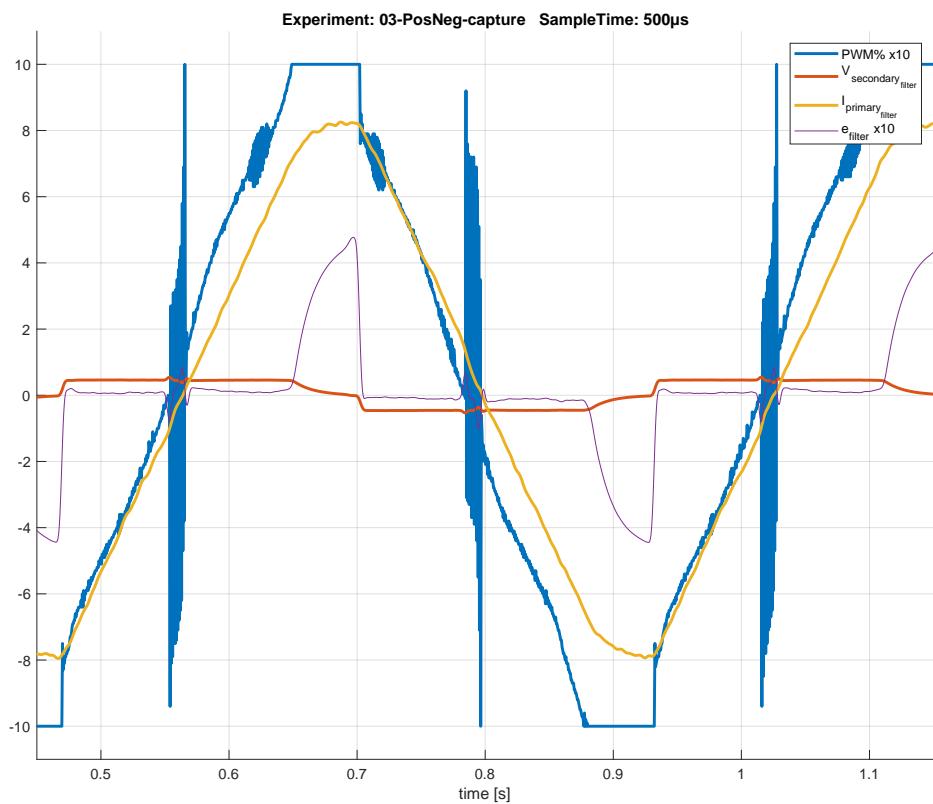


Come abbiamo avuto modo di vedere nel capitolo "[Stima del modello del sistema](#)", il modello lineare che abbiamo trovato, taglia tutta una serie di *Non-Linearità* presenti invece nell'impianto e particolarmente evidenti nei pressi della **Dead-Zone** e della **Saturazione**, ma il controllo in catena chiusa riesce a gestire questi problemi e il sistema sin dall'inizio tende a 0 esponenzialmente, la presenza del termine proporzionale permette di reagire immediatamente alla variazione del riferimento, mantenendo l'errore minimo sin dall'inizio.

### 5.3.2 Inseguimento Triangolare

In questo secondo esperimento, *MARTe2Moc* è stato programmato per invertire il segno del riferimento ogni volta che il controllo arriva in saturazione, l'obiettivo del test è vedere la risposta del controllo nei pressi della **Dead-Zone** e in corrispondenza di inversione di polarità, il continuo ribaltamento del  $V_{2_{ref}}$  impedisce di arrivare in saturazione troppo a lungo, rendendo l'esperimento periodico e illimitato nel tempo.

Figura 5.5: Inseguimento Triangolare  $V_{2_{ref}} = \pm 0.5V$

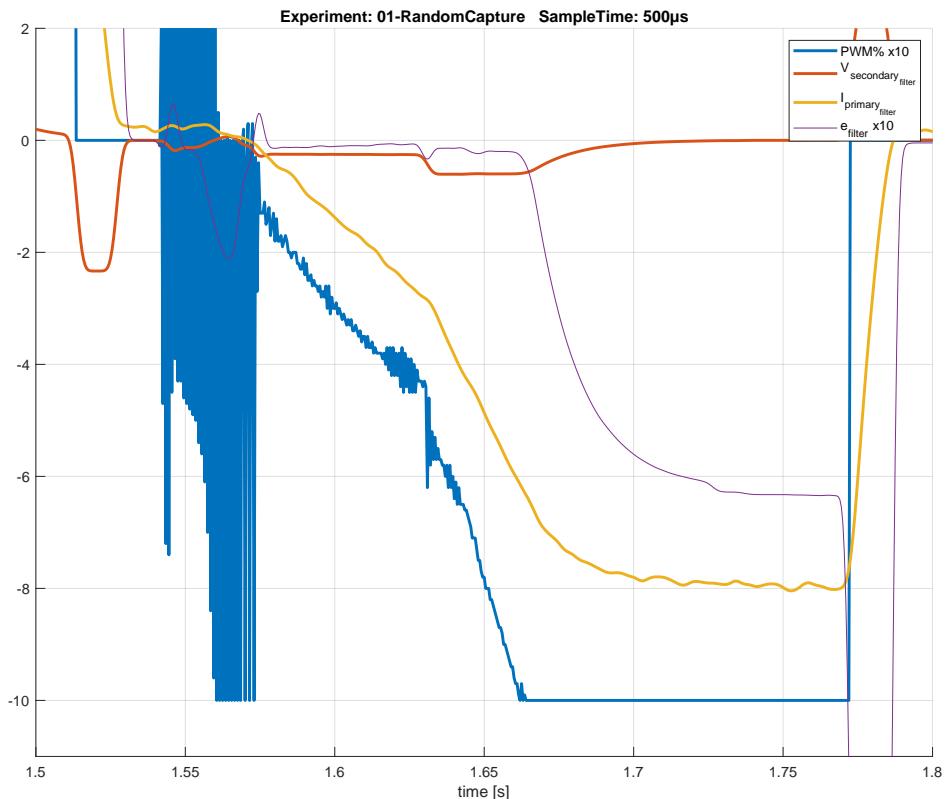


Come è possibile vedere, nei pressi della **Dead-Zone** la presenza della zona morta fa sì che l'errore cresca, ma questa crescita è non superiore a  $0.02V$ , mostrando quanto robusto sia questo design di controllo anche in presenza delle *Non-Linearità* non modellate nel modello.

### 5.3.3 Cambio riferimento in corsa

In questo terzo esperimento, *MARTE2Moc* è stato programmato per inviare un nuovo riferimento casuale, nel grafico riportato vi è stato prima un inseguimento "lento", seguito da uno "ripido", con una pronta risposta che ha saputo inseguire il cambio mantenendo trascurabile l'errore:

Figura 5.6: Cambio di  $V_{2ref}$  prima della saturazione



## 5.4 Rumorosità nel controllo

Essendo il controllo in realtà discreto, e soltanto nel range  $\text{PWM} \in [120, 200]$ , è quindi costretto a salire e scendere localmente ad alta frequenza, questo andamento è particolarmente visibile nei pressi delle *Non-Linearità* da noi trascurate.

Il poter avere un controllo in realtà più smooth permetterebbe di migliorare queste oscillazioni e potenzialmente migliorare ulteriormente le performance (già ottime) del sistema aumentando ancora i coefficienti del controllore.

# Capitolo 6

## Conclusioni e sviluppi futuri

### Conclusioni

In conclusione, con questo prototipo si è realizzato un controllore *PID-style* a doppio Polo nell'origine, il quale si è dimostrato esser un design di controllore adatto ad un generico impianto Tokamak.

La realizzazione di questo prototipo però, come per ogni progetto pratico, ha dovuto confrontarsi con vari problemi:

*Non-Linearità* nel prototipo reale, problemi implementativi, limiti di attuazione e campionamento, etc...

La risoluzione di questi problemi ha portato a compromessi e semplificazioni volte a catturare gli aspetti principali dell'esperimento, trascurando quelli secondari.

Il controllo così creato, oltre a funzionare bene nella teoria, risulta robusto alle variazioni dal modello lineare, e ciò rende un simile design di controllo *general-purple* per impianti Tokamak, poiché i coefficienti trovati nel corso di questa tesi permettono l'ottimizzazione per questo impianto in particolare, ma porterebbero a convergenza un qualunque impianto Tokamak avente la stessa struttura nella dinamica.

## Sviluppi Futuri

Anche se per i fini della tesi il lavoro termina qui, il progetto in sé ancora avanza, e tra gli sviluppi futuri abbiamo:

- L'intenzione di portare un controllo **Switching** nella legge di Update, variando i coefficienti del controllore [4.3.6](#)

In tal senso il controllore implementato nel  $\mu$ **Controllore**, ottenuto dal modello nello spazio di stato in Forma Compagna di Osservatore (Zanasi, «[Forme Canoniche Spazio di Stato](#)») già rende il sistema pronto per questo tipo di modifica a livello di codice, è necessario tuttavia studiare e simulare per quali soglie lo switch dei parametri può incrementare le performance, prima di poter implementare una simile tecnica.

- Attualmente è in cantiere la realizzazione all'interno di *MARTe2* della libreria [Embedded Messege Pack\(EMP\)](#) per permettere l'integrazione di questo firmware con l'ecosistema *MARTe2*.
- Risulta di interesse eseguire un upgrade del  $\mu$ **Controllore** dal'**Arduino Uno** a una scheda più performante, e che permetta comunicazioni, campionamenti e PWM a frequenze superiori, superando così l'attuale soglia di  $2Khz$  nel controllo.
- In fine, per raggiungere performance superiori è necessario avere un motore superiore, in questo caso il Ponte-H, trovarne uno con una dinamica più lineare e che possa funzionare a frequenze maggiori di PWM permetterebbe di avere un controllo sul Primario molto più fine e potente, portando a migliorare le prestazioni in maniera sensibile e tangibile.

# Appendice A

## Arduino Code

### 7.1 Set-up Registri

#### 7.1.1 Tic Timer

---

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

---

Listing 7.1: 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 affinchè il conteggio sia il più vicino possibile a tempo desiderato

#### 7.1.2 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 7.2: 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 7.3: 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.

## 7.2 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

### 7.2.1 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 7.4: Rampa Saturata

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

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

## 7.2.2 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 7.5: Onda Triangolare Periodica

### Onda Trapezoidale (RapidShot)

---

```

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    if (dTic <= t1) {
11        pwmRapidShot = ramp(dTic, 0, 0, 100, t1);
12    } else if (dTic <= t2) {
13        pwmRapidShot = 100;
14    } else if (dTic <= t3) {
15        // falling ramp
16        pwmRapidShot = ramp(dTic, 100, t2, 0, t3);
17    } else if (dTic <= t4) {
18        pwmRapidShot = 0;
19    }
20    return pwmRapidShot;
21}
22}

```

---

Listing 7.6: Onda Trapezoidale Periodica (RapidShot)

## 7.3 Codici Controllore

### Setup dell'esperimento

---

```

1 void setup() {
2     mpSerial.begin(2000000);
3
4     memset(&pRead, 0, sizeof(pRead));
5     memset(&pWrite, 0, sizeof(pWrite));
6
7     // Motori
8     setMotFreq(hz30k);
9     mot = new DCdriver(enPwm, inA, inB);
10
11    // Mean find
12    pMean.V2_mean = offsetCalc(V2, 5);
13    pMean.Isense_mean = offsetCalc(Isense, 5);
14    pMean.dt = dtExperiment;
15
16    // Ctrl Reference
17    Ctrl.setNewRef(tic, 0);
18
19    // ##### Start Experiment #####
20    mpSerial.bufClear();
21    // Start Delay
22    memset(&pWrite, 0, sizeof(pWrite));
23    pWrite.type = sampleType;
24    delay(1000);
25    periodicTask(pMean.dt);
26    sei();
27 }
```

---

Listing 7.7: Setup del Controllore

### Loop di Controllo

---

```

1 volatile u32 oldTic = tic;
2 int readData;
3 int pwm;
4 void loop() {
5     mpSerial.updateState();
6     do {
7         readData = mpSerial.getData_try(&pRead);
8         if (readData >= 0) {
9             serialExe(&pRead);
10        }
11    } while (tic == oldTic);
12
13    pWrite.read.V2_read = analogRead(V2);
14    pWrite.read.Isense_read = analogRead(Isense);
15    pwm = mot->drive_motor(Ctrl.ctrlStep(oldTic, pWrite.read.V2_read - pMean.V2_mean));
16    pWrite.read.pwm = pwm;
17    pWrite.read.err = Ctrl.lastErr;
18
19    oldTic++; // Suppose no over time
20    mpSerial.packSend(&pWrite, sizeof(pWrite.type) + sizeof(pWrite.read));
21 }
```

---

Listing 7.8: Loop di Controllo

### 7.3.1 Classe Controllore

---

```

1 // Common define
2 #define volt2adc(x) ((int)((((x) / (5.0 / (1023)) + 0.5)))
3 #define dtExperiment 500UL // us
4 #define ticConvert(ms) ((ms * 1000UL) / dtExperiment)
5 #define Ts (dtExperiment / 1000000.0) // second
6
7 class iiCTRL {
8     // Saturation showdown experiment
9     unsigned int ticSatCount = 0;
10    // Adc Current Voltage reference
11    int V2currRef = 0;
12
13    float kp = 0.0;
14    float k1 = 0.8;
15    float k2 = 0.05;
16
17    // State Space Cii(s)
18    float xCii1 = 0, xCii2 = 0;
19    // State Space Ci(s)
20    float xCi1 = 0;
21 public:
22     int lastCtrl;
23     int lastErr;
24     iiCTRL();
25     iiCTRL(float k2, float k1, float kp);
26
27     // State update
28     void setNewRef(uint64_t ticSet, int v2AdcNewRef); // v2AdcNewRef senza offset
29     int ctrlStep(uint64_t t, int v2Adc); // v2Add gi senza offset
30
31     // For switching logic
32     void changeK(float k2, float k1, float kp);
33     void changeK2(float k2);
34     void changeK1(float k1);
35     void changeKp(float kp);
36
37 private:
38     void stateReset(int setOutput);
39 }
```

---

Listing 7.9: Header Classe controllore C(s)

La classe `iiCTRL` implementa il controllore 4.3.6 e usa le matrici di discretizzazione riportate nella tabella "Funzioni di trasferimento nello spazio di Stato, da Tempo Continuo a Tempo Discreto" per implementarle a tempo continuo.

---

```

1 iiCTRL::iiCTRL() : iiCTRL(20000, 4000, 0.3) {}
2
3 iiCTRL::iiCTRL( float k2, float k1, float kp) {
4     changeK(k2, k1, kp);
5     setNewRef(0, 0);
6 }
7
8 void iiCTRL::setNewRef(uint64_t ticSet, int v2AdcNewRef) {
9     V2currRef = v2AdcNewRef;
10    ticSatCount = 0;
11 }
12
13 int iiCTRL::ctrlStep(uint64_t t, int v2Adc) {
14     //Saturation Check
15     if (ticSatCount >= ticConvert(200)){
16         stateReset(0);
17         return 0;
18     }
19     //Error Calc (ADC value), u_k per i sistema dinamico
20     lastErr = (V2currRef - v2Adc);
21     // Caso speciale: Riferimento a 0 => spengo tutto
22     if (V2currRef == 0){
23         stateReset(0);
24         return 0;
25     }
26     // ##### Space State Update #####
27     // State update Cii(s)
28     xCii1 = xCii1 + Ts * xCii2 + (sq(Ts) / 2.0) * k2 * lastErr;
29     xCii2 = xCii2 + Ts * k2 * lastErr;
30     // State update Ci(s)
31     xCi1 = xCi1 + Ts * k1 * lastErr;
32     float yCp = kp * lastErr;
33
34     // ##### Output calc #####
35     lastCtrl = xCii1 + xCi1 + yCp; // y_k
36     lastCtrl = constrain(lastCtrl, -1000, 1000); // Limitazione +-1000
37     if (abs(lastCtrl) == 1000) {
38         ticSatCount++;
39         stateReset(lastCtrl);
40     } else
41     ticSatCount = 0;
42     return lastCtrl;
43 }
44
45 void iiCTRL::stateReset(int setOutput) {
46     // Riassegno tutto l'output su Cii(s)
47     float rap = xCii1 / xCi1;
48     xCii1 = setOutput;
49     xCii2 = 0;
50     xCi1 = 0;
51 }
52
53 void iiCTRL::changeK( float k2, float k1, float kp) {
54     changeK2(k2);
55     changeK1(k1);
56     changeKp(kp);
57 }
58
59 void iiCTRL::changeK2( float k2) { this->k2 = k2; }
60 void iiCTRL::changeK1( float k1) { this->k1 = k1; }
61 void iiCTRL::changeKp( float kp) { this->kp = kp; }

```

---

Listing 7.10: Source Classe controllore C(s)

# Appendice B

## EMP Code

### 8.4 Pacchetti in EMP

#### 8.4.1 Definizione di 2 Pacchetti

Ecco di seguito un esempio di definizione asimmetrica per pacchetti da un Device (Linux), verso un altro (Arduino), e viceversa:

---

```
1 #include <stdint.h> // To be sure for the footPrint in any platform
2 struct _packLinux2Ard {
3     int16_t num;
4     char buf[20];
5 } __attribute__((packed));
6 typedef struct _packLinux2Ard packLinux2Ard;
7
8 struct _packArd2Linux {
9     int16_t num;
10    char buf[10];
11 } __attribute__((packed));
12 typedef struct _packArd2Linux packArd2Linux;
```

---

Listing 8.11: Esempio di definizione Pacchetto in EMP

Come si può osservare, il sistema non necessita di alcun formato particolare per la definizione dei pacchetti, essi sono delle semplici strutture in C, con l'attributo `__attribute__((packed))` per eliminare Padding e ottimizzare la memoria. Come è possibile notare, le regole non vietano la definizione di 2 pacchetti diversi e asimmetrici.

### 8.4.2 Pacchetti Multipli

Per definire un pacchetto di pacchetti, il metodo migliore è creare un `enum` per numerare univocamente il tipo (nell'esempio `uint8_t` ma può essere reso maggiore all'occorrenza), e una `union` con tutti i tipi in fila.

Il pacchetto di interesse per Embedded Message Pack(EMP) è `dataSend`, ed è responsabilità dell'utente della libreria riempire correttamente i campi.

---

```

1 //(DataType1 ,DataType2 , DataType3  typedef  above;
2 enum packTypeSend : uint8_t{
3     DataType1code ,
4     DataType2code ,
5     DataType3code ,
6 };
7 typedef union{
8     DataType1 t1;
9     DataType2 t2;
10    DataType3 t3;
11 } __attribute__((packed)) dataSendUnion;
12
13 typedef struct{
14     packTypeSend type;
15     dataSendUnion pack;
16 } __attribute__((packed)) dataSend;
```

---

Listing 8.12: Definizione Pacchetti Multipli

Per ottimizzare l'invio al minimo strettamente necessario si può quindi usare la variante nel metodo di `packSend(...)`, in cui viene specificata la dimensione:

---

```

1 //...
2 dataSend.type = DataType2code;
3 dataSend.pack.t2 = /*{data}*/ // fill correctly dataSend
4 //...
5 MP->packSend(&data , sizeof(packTypeSend) + sizeof(DataType2));
6 //...
```

---

Listing 8.13: Definizione Pacchetti Multipli

# Appendice C

## Matlab Post Elaborazione

### 9.5 Importazione dei Dati

#### 9.5.1 Parsing Tabelle

---

```
1 function [Table, Info] = importExperiment(filename)
2 % #####
3 % ### Mean Import ####
4 % #####
5 opts = delimitedTextImportOptions("NumVariables", 4);
6 % Specify range and delimiter
7 opts.DataLines = [2, 2];
8 opts.Delimiter = "\t";
9 % Specify column names and types
10 opts.VariableNames = ["V2_mean", "Isense_mean", "dt", "V2Ref_set"];
11 opts.SelectedVariableNames = ["V2_mean", "Isense_mean", "dt", "V2Ref_set"];
12 opts.VariableTypes = ["double", "double", "double", "double"];
13 % Specify file level properties
14 opts.ExtraColumnsRule = "ignore";
15 opts.EmptyLineRule = "read";
16 % Import the data
17 Info = readtable(filename, opts);
18 Info.dt = Info.dt * 1E-6; % dt shuld be in second
19 [~, name, ~] = fileparts(filename);
20 Info.Properties.Description = name;
21 % #####
22 % ### Data Import ####
23 % #####
24 % Set up the Import Options and import the data
25 opts = delimitedTextImportOptions("NumVariables", 3);
26 dataLines = [4, Inf];
27 % Specify range and delimiter
28 opts.DataLines = dataLines;
29 opts.Delimiter = "\t";
30 % Specify column names and types
31 opts.VariableNames = ["PWM", "V2_read", "Isense_read"];
32 opts.VariableTypes = ["double", "double", "double"];
33 % Specify file level properties
34 opts.ExtraColumnsRule = "ignore";
35 opts.EmptyLineRule = "read";
36 % Import the data
37 Table = readtable(filename, opts);
38 Table = tableConvert(Table, Info);
39 end
```

---

Listing 9.14: Parsing delle tabelle

### 9.5.2 Conversione dei Dati

Il parsing delle tabelle si appoggia alla conversione e filtraggio dei dati qui riportato:

---

```

1 function tCon = tableConvert(table , Info)
2 % Utility Factor
3 vScale = 5/(2^10-1);           % ADC sensitivity
4 IScale = vScale / 0.020;       % Isensitivity = 20mv/A
5 V2Mean = Info.V2_mean;
6 IsenseMean = Info.Isense_mean;
7 dt = Info.dt;
8 vRef = Info.V2Ref_set;
9 % New Table
10 tCon = table;
11 tCon.PWMDead = pwm2duty(tCon.PWM,60,210);
12 tCon.PWM=tCon.PWM/255;
13 tCon.V2_read = (table.V2_read - V2Mean) * vScale;
14 tCon.Isense_read = (table.Isense_read - IsenseMean) * IScale;
15 tCon.error = (tCon.V2_read - vRef * vScale);
16
17 d = designfilt('lowpassfir', ...
18 'PassbandFrequency',0.01,'StopbandFrequency',0.4, ...
19 'PassbandRipple',1,'StopbandAttenuation',60, ...
20 'DesignMethod','equiripple');
21 tCon.V2_readFilter = filtfilt(d,tCon.V2_read);
22 end

```

---

Listing 9.15: Parsing delle tabelle

Usando come funzioni accessorie:

---

```

1 function u = pwm2duty(pwmList , downDead , upDead)
2 u = zeros(length(pwmList),1);
3 for i = 1:length(pwmList)
4     pwm = pwmList(i);
5     if (abs(pwm)>=upDead)
6         u(i)=sign(pwm);
7         continue
8     end
9     if (abs(pwm)<=downDead)
10        u(i) = 0;
11        continue
12    end
13    if (pwm>0)
14        u(i) = map(pwm,downDead,upDead,0,1);
15        continue
16    else
17        u(i) = -map(-pwm,downDead,upDead,0,1);
18        continue
19    end
20 end
21 end
22
23 function u = map ( var , varMin , varMax , outMin , outMax)
24     u = ((var-varMin)/(varMax-varMin));
25     u = (u * outMax) + ((1-u)*outMin);
26 end

```

---

Listing 9.16: Parsing delle tabelle

## 9.6 Stima Parametri

### 9.6.1 Stima parametri automatica

---

```

1 % ##### PWM-I2 Auto Estimation #####
2 % DAT = iddata(Y,U,Ts)
3 PrimaryFrameData = iddata(experiment.Isense_read, experiment.PWMDead, Info.dt);
4
5 % ##### PWM-I1 Estimation #####
6 % DAT = iddata(Y,U,Ts)
7 InPriRiseFrameData = iddata(experiment.Isense_read(1:1200), experiment.PWMDead
8 (1:1200), Info.dt);
9
10 % SYS = tfest(DATA, NP, NZ, IODELAY)
11 tfExtPWM_I1 = tfest(InPriRiseFrameData, 1, 0, NaN)
12 % lsim(SYS,U,T)
13 yExtPWM_I1Fit = lsim(tfExtPWM_I1, experiment.PWMDead(1:1200), t(1:1200));
14
15 % ##### Primary - Secondary Rise Estimation #####
16 % DAT = iddata(Y,U,Ts)
17 PriSecRiseFrameData = iddata(experiment.V2_read(1:1200), yExtPWM_I1Fit, Info.dt);
18 tfExtI1_V2 = tfest(PriSecRiseFrameData, 1, 1, NaN)
19
20 % ##### Simulation #####
21 yExtPWM_I1 = lsim(tfExtPWM_I1, experiment.PWMDead, t);
22 yExtI1_V2 = lsim(tfExtI1_V2, yExtPWM_I1, t);
23
24 figure(1)
25 plotTable(experiment, Info, [0.2, 1.2], [-inf, inf], [yExtPWM_I1, yExtI1_V2], {'yExtPWM-I1',
26 'yExtI1-V2'}, 'autoExt');

```

---

Listing 9.17: Stima corrente Primario automatica

### 9.6.2 Stima parametri manuale

---

```

1 % ##### PWM-I2 Manual Estimation #####
2 % fPWM_I1 = tf([0.022 1]);
3 % yfPWM_I1 = lsim(fPWM_I1, experiment.PWMDead, t);
4
5 fI1_V2 = tf([0.0085 0],[1/2800 1]);
6 yfI1_V2 = lsim(fI1_V2,yfPWM_I1,t);
7
8 figure(2)
9 plotTable(experiment, Info, [0.2, 1.2], [-inf, inf], [yfPWM_I1, yfI1_V2], {'yfPWM-I1',
10 'yfI1-V2'}, 'manualExt');

```

---

Listing 9.18: Stima parametri manuale

### 9.6.3 Plot dell'esperimento

---

```

1 function plotTable(table, Info, xLim, yLim, ySim, ySimLegend, nameSave)
2 V2Mean = Info.V2_mean;
3 IsenseMean = Info.Isense_mean;
4 dt = Info.dt;
5 vRef = Info.V2Ref_set;
6
7 name = Info.Properties.Description;
8 [len, ~] = size(table);
9
10 t = [0:len-1]' * dt;
11
12 clf
13 grid on
14 hold on
15 plot(t,table.PWMDead,'LineWidth',2)
16 plot(t,table.V2_readFilter,'LineWidth',2)
17 plot(t,table.Isense_readFilter,'LineWidth',2)
18 for y = ySim
19     plot(t,y,'LineWidth',1);
20 end
21 legNorm = { 'PWM%-DeadFilter', 'V_{secondary}', 'I_{primary}' };
22
23 legend(cat(2,legNorm,ySimLegend));
24
25 title("Experiment: "+name+ " SampleTime: " + mat2str(dt * 1000000) + "us")
26 xlabel("time [s]")
27 xlim(xLim);
28 ylim(yLim);
29
30 % Figure Export and Save
31 savePath = "./img/";
32 [~,~] = mkdir(savePath);
33 set(gcf, 'PaperUnits', 'normalized')
34 set(gcf, 'PaperPosition', [0 0 1 1])
35 set(gcf, 'PaperOrientation', 'landscape');
36 saveas(gcf,savePath+name+'_'+nameSave+'.png')
37 saveas(gcf,savePath+name+'_'+nameSave+'.pdf')
38 end

```

---

Listing 9.19: Plot dell'esperimento

# Elenco delle figure

1	Sezione di un Tokamak . . . . .	5
2	Geometria di un Toro . . . . .	6
3	Architettura Complessiva Progetto ENEA . . . . .	7
1.1	Schema interno di un Tokamak . . . . .	9
1.2	Trasformatore ideale con Campo magnetico . . . . .	12
1.3	Circuito Equivalente Bobina/Plasma all'interno di un Tokamak . . . . .	14
1.4	Circuito Semplificato Bobina/Plasma . . . . .	15
1.5	Schema a Blocchi della funzione di trasferimento della corrente di Plasma . . . . .	18
1.6	Circuito reale di misura dell'esperimento . . . . .	19
1.7	Sensore di Corrente ACS770LCB-100B-PFF-T . . . . .	20
1.8	Metodo di misura di corrente mediante effetto Hall . . . . .	21
1.9	ACS770LCB-100B-PFF-T Schema a Blocchi . . . . .	22
1.10	ACS770LCB-100B-PFF-T Sensibilità rispetto Temperatura . . . . .	23
1.11	ACS770LCB-100B-PFF-T <i>Non-Linearità</i> . . . . .	23
1.12	ACS770LCB-100B-PFF-T Schema di collegamento dal Datasheet . . . . .	24
1.13	Driver Motori IBT-2 TopView & PinOut . . . . .	26
1.14	IBT-2 Schema Elettrico . . . . .	27
1.15	Esperimento con Onda Triangolare . . . . .	29
1.16	Esperimento con Onda Trapezoidale ( <i>Rapid Shot</i> ) . . . . .	30

2.1	Schema finale dell'architettura di controllo . . . . .	31
2.2	Scheda Arduino Uno . . . . .	32
2.3	Esempio di COBS . . . . .	35
2.4	Esempio di COBS con distanza . . . . .	35
2.5	Class Diagram UML di EMP . . . . .	38
2.6	Sequence Diagram UML di EMP . . . . .	40
2.7	EMP Benchmark Testing Flow . . . . .	41
2.8	Circuito equivalente del Plasma con l'offset delle Misure . . . . .	42
3.1	Simulazione con stima automatica . . . . .	48
3.2	Simulazione con parametri tarati a mano . . . . .	49
3.3	Esperimento di verifica della stima 1 . . . . .	50
3.4	Esperimento di verifica della stima 2 . . . . .	51
3.5	Esperimento di verifica della stima 3 . . . . .	51
4.1	Sistema da controllare a blocchi con $P(s)$ . . . . .	53
4.2	Sistema da controllare ingresso-uscita reale . . . . .	54
4.3	Modelli simulati su Simulink . . . . .	59
4.4	Modelli simulati su Simulink . . . . .	60
4.5	Controllo Avanzato $K_p=0 K_1=0 K_2=100$ . . . . .	61
4.6	Controllo Avanzato $K_p=0 K_1=10 K_2=100$ . . . . .	62
4.7	Controllo Avanzato $K_p=0 K_1=100 K_2=500$ . . . . .	63
4.8	Controllo Avanzato $K_p=0.2 K_1=100 K_2=500$ . . . . .	64
4.9	Controllo Avanzato $K_p=0.8 K_1=100 K_2=500$ . . . . .	65
5.1	Impianto Reale . . . . .	67
5.2	Discretizzazione Zero-Order Hold $H_d(z)$ del sistema Tempo continuo $H(s)$ . . . . .	69

5.3	Effetto sui segnali discretizzati con il metodo Zero-Order Hold . . . . .	69
5.4	Esperimento singolo $V_{2ref} = 0.5V$ . . . . .	72
5.5	Inseguimento Triangolare $V_{2ref} = \pm 0.5V$ . . . . .	73
5.6	Cambio di $V_{2ref}$ prima della saturazione . . . . .	74

# Elenco delle tabelle

1.1	Allegro, <i>High-Precision Linear Current Sensor</i> Riassunto caratteristiche . . . . .	20
1.2	ACS770LCB-100B-PFF-T Particolarità . . . . .	21
1.3	IBT-2 Specifiche . . . . .	26
1.4	Fasce della Dead-Zone . . . . .	30
2.1	Salvataggio di 'struct setUpPack' . . . . .	44
2.2	Salvataggio di 'struct sample' $\forall dt$ . . . . .	44
3.1	Stime parametri con <i>System Identification Toolbox</i> . . . . .	47
3.2	Stime parametri tarati a mano . . . . .	49
5.1	Funzioni di trasferimento nello spazio di Stato, da Tempo Continuo a Tempo Discreto	70

# Elenco dei codici

2.1	Pacchetti Companion $\Rightarrow \mu\mathbf{Controllore}$	43
2.2	Pacchetti $\mu\mathbf{Controllore} \Rightarrow$ Companion	43
7.1	Tic Timer	77
7.2	Frequenza PWM	77
7.3	Macro per calcolo Offset	78
7.4	Rampa Saturata	79
7.5	Onda Triangolare Periodica	80
7.6	Onda Trapezoidale Periodica (RapidShot)	80
7.7	Setup del Controllore	81
7.8	Loop di Controllo	81
7.9	Header Classe controllore C(s)	82
7.10	Source Classe controllore C(s)	83
8.11	Esempio di definizione Pacchetto in EMP	84
8.12	Definizione Pacchetti Multipli	85
8.13	Definizione Pacchetti Multipli	85
9.14	Parsing delle tabelle	86
9.15	Parsing delle tabelle	87
9.16	Parsing delle tabelle	87
9.17	Stima corrente Primario automatica	88

9.18 Stima parametri manuale . . . . .	88
9.19 Plot dell'esperimento . . . . .	89

# Bibliografia

<b>Alfano: Embedded Message Pack(EMP)</b>	<b>EMP</b>
Emanuele Alfano. <i>Embedded Message Pack(EMP)</i> . Repository. 24 Sep 2021. URL: <a href="https://github.com/Alfystar/EMP">https://github.com/Alfystar/EMP</a> .	
<b>Allegro: High-Precision Linear Current Sensor</b>	<b>ACS770</b>
Allegro. <i>High-Precision Linear Current Sensor</i> . ACS770LCB-100B-PFF-T. Datasheet. 31 May 2019. URL: <a href="https://www.allegromicro.com/~/media/Files/Datasheets/ACS770-Datasheet.pdf">https://www.allegromicro.com/~/media/Files/Datasheets/ACS770-Datasheet.pdf</a> .	
<b>Carnevale: Performances and robustness</b>	<b>PerfAndRobust</b>
Daniele Carnevale. «Performances and robustness». In: Università di Tor Vergata. 19 Oct 2017. URL: <a href="https://drive.google.com/file/d/15sorq07mvLST4o60CxF3DakUI8L3cFU_/view">https://drive.google.com/file/d/15sorq07mvLST4o60CxF3DakUI8L3cFU_/view</a> .	
<b>Checksum Calculation 8 Bit (CRC8)</b>	<b>CRC8</b>
<i>Checksum Calculation 8 Bit (CRC8)</i> . Rapp. tecn. Mouser Electronics, 15 Apr 2019. URL: <a href="https://www.mouser.com/pdfDocs/SFM4100_CRC_Checksum_Calculation.pdf">https://www.mouser.com/pdfDocs/SFM4100_CRC_Checksum_Calculation.pdf</a> .	
<b>Cianfarani: MAGNETIC DIAGNOSTICS FOR FUSION MACHINES</b>	<b>MagneticDiagnostics</b>
Cesidio Cianfarani. «MAGNETIC DIAGNOSTICS FOR FUSION MACHINES». In: <i>MAGNETIC DIAGNOSTICS FOR FUSION MACHINES</i> . Associazione Euratom-ENEA sulla Fusione. 11 Apr 2013. URL: <a href="https://www.fsn-fusphy.enea.it/Intranet/index.php/seminari-interni/download-file?path=Seminari-Workshop-WIP-Corsi+Interni%2FCorsi+Interni%2FCorso+Rd0+2015%2FSLIDES%26+AUDIO%2F13+Diagnostiche+Magnetiche%28Cianfarani%29%2FMagnetic+Diagnostics+2.2+-+Cianfarani.pdf">https://www.fsn-fusphy.enea.it/Intranet/index.php/seminari-interni/download-file?path=Seminari-Workshop-WIP-Corsi+Interni%2FCorsi+Interni%2FCorso+Rd0+2015%2FSLIDES%26+AUDIO%2F13+Diagnostiche+Magnetiche%28Cianfarani%29%2FMagnetic+Diagnostics+2.2+-+Cianfarani.pdf</a> .	
<b>Handsontec: BTS7960 High Current 43A H-Bridge Motor Driver</b>	<b>IBT-2</b>
Handsontec. <i>BTS7960 High Current 43A H-Bridge Motor Driver</i> . Datasheet. 18 Sep 2019. URL: <a href="https://www.handsontec.com/dataspecs/module/BTS7960%20Motor%20Driver.pdf">https://www.handsontec.com/dataspecs/module/BTS7960%20Motor%20Driver.pdf</a> .	
<b>IEEE: Consistent Overhead Byte Stuffing (COBS)</b>	<b>COBS</b>
IEEE. <i>Consistent Overhead Byte Stuffing (COBS)</i> . Rapp. tecn. IEEE, 29 Jun 2002. URL: <a href="https://www.ieee802.org/3/efm/public/jul02/copper/oksman_copper_1_0702.pdf">https://www.ieee802.org/3/efm/public/jul02/copper/oksman_copper_1_0702.pdf</a> .	

**Infineon: BTS7960B High Current PN Half Bridge NovalithIC T** **BTS7960b**

Infineon. *BTS7960B High Current PN Half Bridge NovalithIC T*. BTS7960b. Datasheet. 12 Jul 2016. URL: [shorturl.at/cw0Z8](http://shorturl.at/cw0Z8).

**Johnston: Creating a Circular Buffer in C and C++** **CircularBuffer**

Phillip Johnston. *Creating a Circular Buffer in C and C++*. Online Page. 10 june 2021. URL: <https://embeddedartistry.com/blog/2017/05/17/creating-a-circular-buffer-in-c-and-c/>.

**Matlab: System Identification Toolbox** **IdentificationToolbox**

Matlab. *System Identification Toolbox*. Online Page. URL: <https://it.mathworks.com/products/sysid.html>.

**Matlab: Zero-phase digital filtering** **zeroPhaseShiftFilter**

Matlab. *Zero-phase digital filtering*. Online Manual. 2006. URL: <https://it.mathworks.com/help/signal/ref/filtfilt.html>.

**rdavide: Trasformata di Laplace** **Laplace**

rdavide. «Trasformata di Laplace». In: Università di Pavia. 2 Apr 2015. URL: <http://sisdin.unipv.it/labsisdin/teaching/courses/falt/files/Laplace.pdf>.

**Redazione: Nozioni di PWM** **modulazionePWM**

Redazione. *Nozioni di PWM*. Online Page. 20 october 2019. URL: <https://www.ingegnerando.it/nozioni-di-pwm/>.

**Romero et al.: Real time current profile control at JET** **TokamakCircuit**

Jesús Romero et al. «Real time current profile control at JET». In: *Fusion Engineering and Design* 43 (feb. 1998), pp. 37–58. DOI: [10.1016/S0920-3796\(98\)00261-0](https://doi.org/10.1016/S0920-3796(98)00261-0).

**Trasformatore Monofase** **Transformatore**

*Trasformatore Monofase*. URL: <https://www.docenti.unina.it/webdocenti-be/allegati/materiale-didattico/34030176>.

**Zanasi: Discretizzazione di un sistema tempo continuo** **Discretizzazione**

Roberto Zanasi. «Discretizzazione di un sistema tempo continuo». In: Università di Modena e Reggio Emilia. 27 Jun 2012. URL: [http://www.dii.unimo.it/~zanasi/didattica/Teoria\\_dei\\_Sistemi/Luc\\_TDS\\_2006\\_Discretizzazione\\_di\\_un\\_sistema\\_continuo.pdf](http://www.dii.unimo.it/~zanasi/didattica/Teoria_dei_Sistemi/Luc_TDS_2006_Discretizzazione_di_un_sistema_continuo.pdf).

**Zanasi: Forme Canoniche Spazio di Stato** **FormeCanoniche**

Roberto Zanasi. «Forme Canoniche Spazio di Stato». In: Università di Modena e Reggio Emilia. 4 Gen 2010. URL: [http://www.dii.unimo.it/~zanasi/didattica/Teoria\\_dei\\_Sistemi/Luc\\_TDS\\_2006\\_Forme\\_Canoniche.pdf](http://www.dii.unimo.it/~zanasi/didattica/Teoria_dei_Sistemi/Luc_TDS_2006_Forme_Canoniche.pdf).