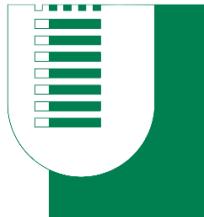


Tesi Sperimentale
Sviluppo di un Mokup per la prototipazione
di architetture di controllo per Tokamak



TOR VERGATA
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA

Relatore

Prof. Daniele Carnevale

Correlatore

Marco Passeri

Candidato

Emanuele Alfano

A.A 2020/2021

Struttura della presentazione

- Tokamak e fusione nucleare

Struttura della presentazione

- Tokamak e fusione nucleare
- Componenti del prototipo

Struttura della presentazione

- Tokamak e fusione nucleare
- Componenti del prototipo
- Modellazione e stima dei parametri

Struttura della presentazione

- Tokamak e fusione nucleare
- Componenti del prototipo
- Modellazione e stima dei parametri
- Creazione del controllo e implementazione

Struttura della presentazione

- Tokamak e fusione nucleare
- Componenti del prototipo
- Modellazione e stima dei parametri
- Creazione del controllo e implementazione
- Libreria di comunicazione (EMP)

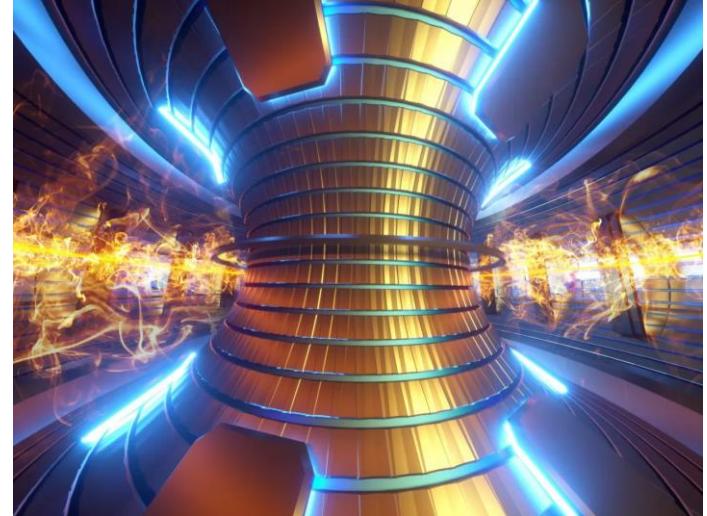
Struttura della presentazione

- Tokamak e fusione nucleare
- Componenti del prototipo
- Modellazione e stima dei parametri
- Creazione del controllo e implementazione
- Libreria di comunicazione (EMP)
- Sviluppi Futuri

Collaborazioni

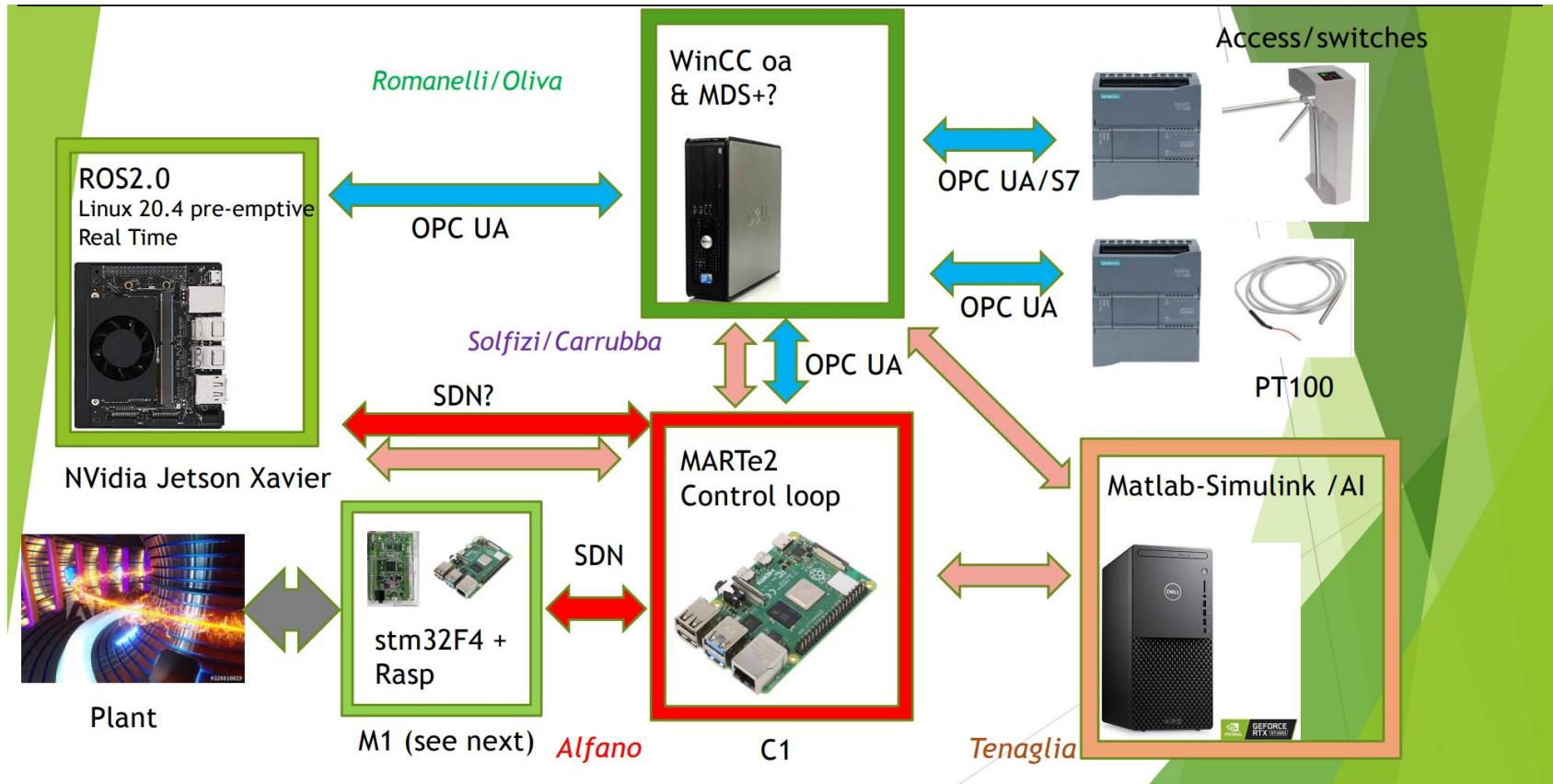
Il progetto si colloca nell'ambito delle tecniche di controllo per impianti Tokamak, realizzata in collaborazione con il centro ricerche ENEA (Ente Nazionale per l'Energia e l'Ambiente) di Frascati e coordinato dal gruppo CODAS (Control and Data Acquisition System).

L'obiettivo del gruppo di ricerca è di ricreare in laboratorio le dinamiche elettromagnetiche di un impianto Tokamak e testare architetture e algoritmi di controllo.



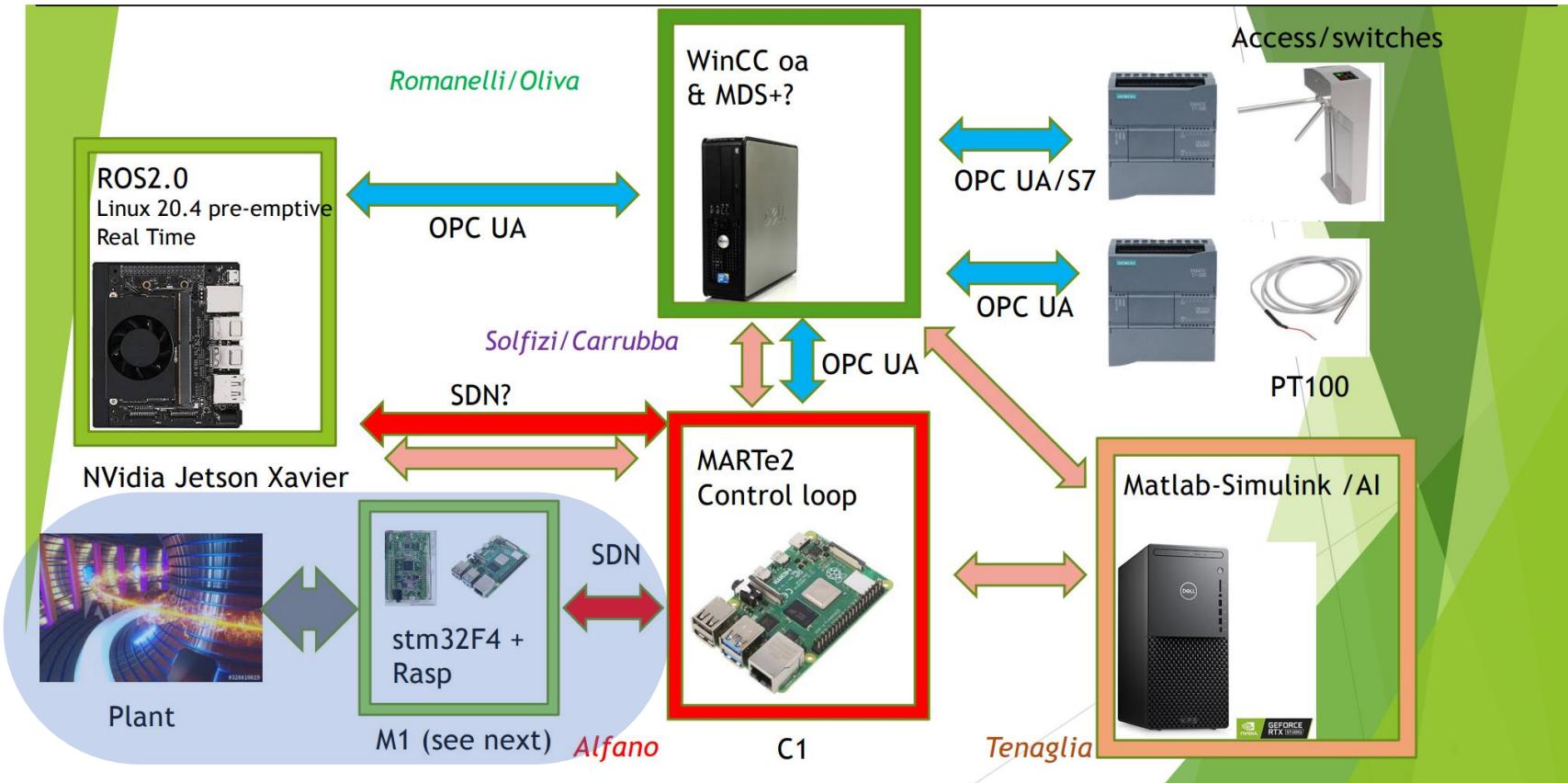
Mokup

Il progetto complessivo punta a realizzare l'architettura di controllo in tutti i suoi aspetti software, con riguardo ai problemi di interconnessione



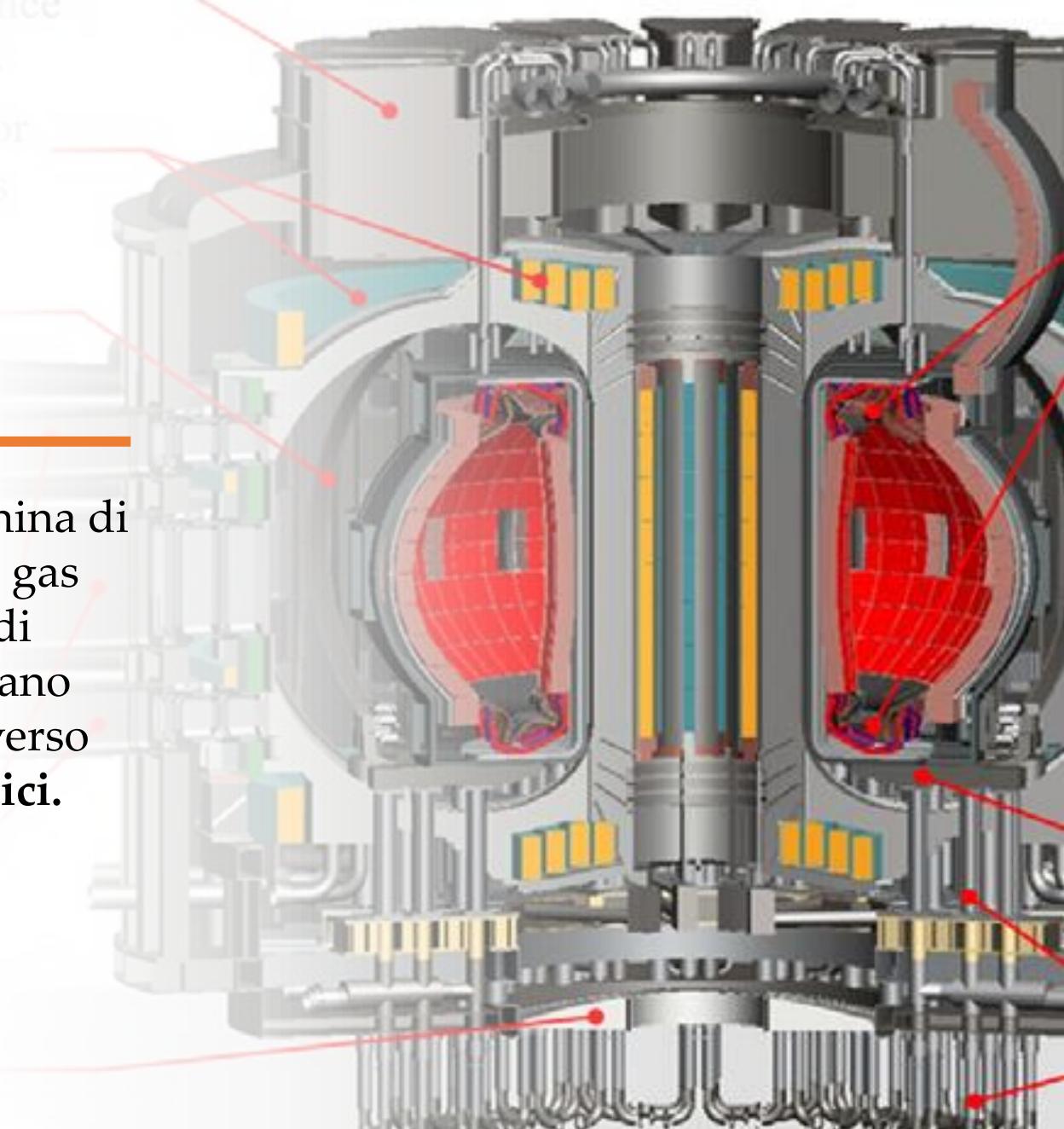
Mokup

Il progetto complessivo punta a realizzare l'architettura di controllo in tutti i suoi aspetti software, con riguardo ai problemi di interconnessione



Tokamak: centrale per la fusione nucleare

Un Tokamak è una macchina di forma **toroidale** in cui un gas viene portato nello stato di **plasma** e mantenuto lontano dalle pareti interne attraverso opportuni **campi magnetici**.



Cos'è la fusione nucleare?

Per fusione termonucleare si intende il processo mediante il quale i nuclei di due o più atomi vengono uniti tra loro. Durante la reazione avviene una perdita di massa con conseguente liberazione di energia, in accordo con l'equazione di Einstein:

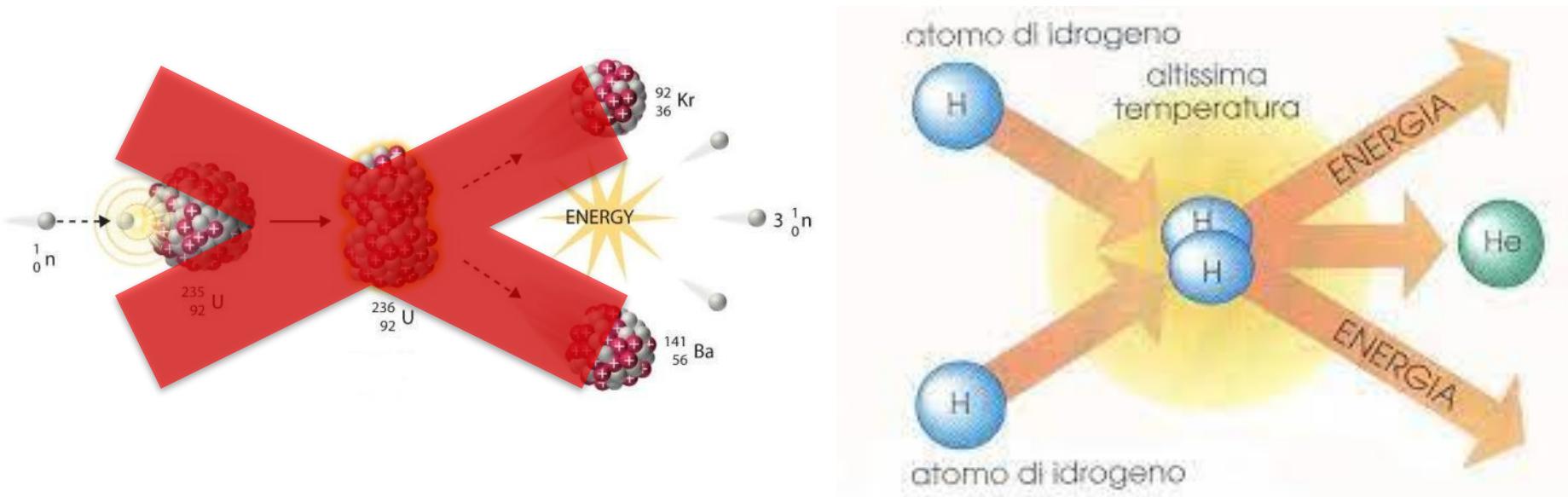
$$E = (m_o - m_f)c^2$$



Perché fusione nucleare?

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 lo sfruttamento in maniera controllata.

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



Fusione nucleare, vantaggi:

- ✓ **Combustibile semi-inesauribile**

Fusione nucleare, vantaggi:

- ✓ **Combustibile semi-inesauribile**
- ✓ **Non si producono scorie radioattive come per la fissione**

Fusione nucleare, vantaggi:

- ✓ **Combustibile semi-inesauribile**
- ✓ **Non si producono scorie radioattive come per la fissione**
- ✓ **La reazione è intrinsecamente stabile**

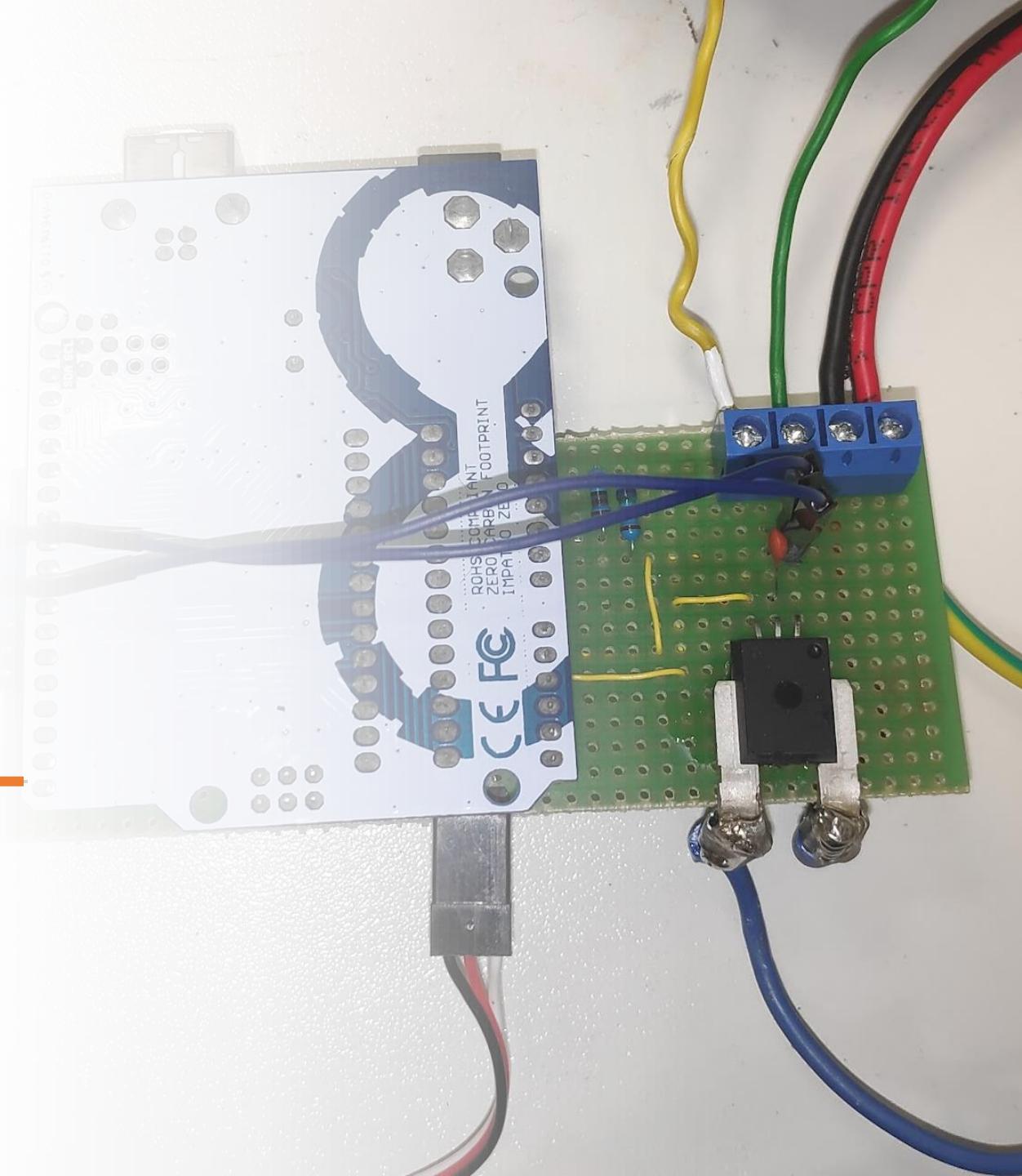
Fusione nucleare, vantaggi:

- ✓ **Combustibile semi-inesauribile**
- ✓ **Non si producono scorie radioattive come per la fissione**
- ✓ **La reazione è intrinsecamente stabile**
- ✓ **Nessuno prodotto derivato è adatto a fini bellici**

Fusione nucleare, vantaggi:

- ✓ **Combustibile semi-inesauribile**
- ✓ **Non si producono scorie radioattive come per la fissione**
- ✓ **La reazione è intrinsecamente stabile**
- ✓ **Nessuno prodotto derivato è adatto a fini bellici**
- ✓ **Livelli di radioattività residua dell'impianto sono lievi e i materiali di scarto hanno tempi di decadimento molto più brevi (100 Anni)**

Prototipo

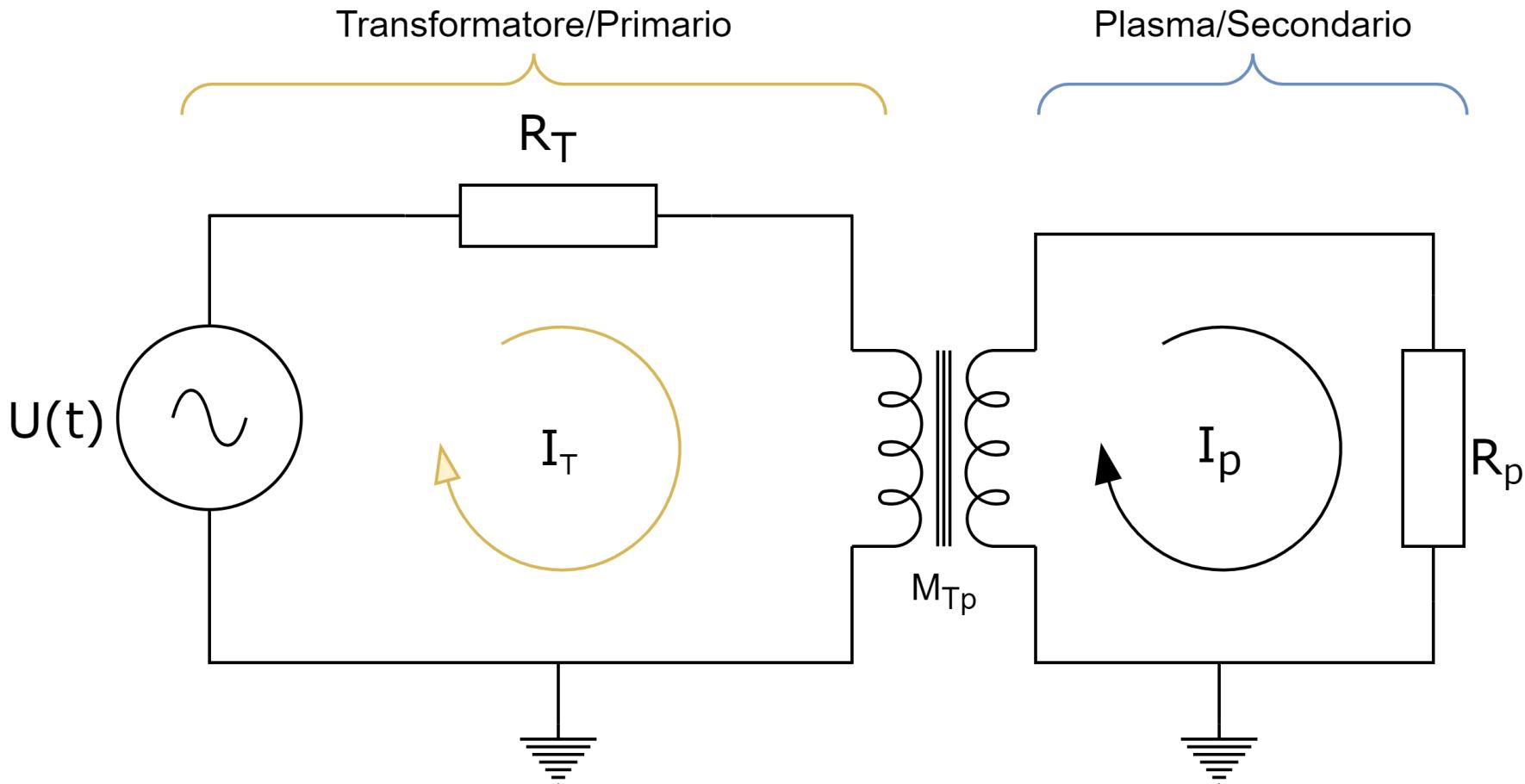


Il trasformatore: un modello di Tokamak



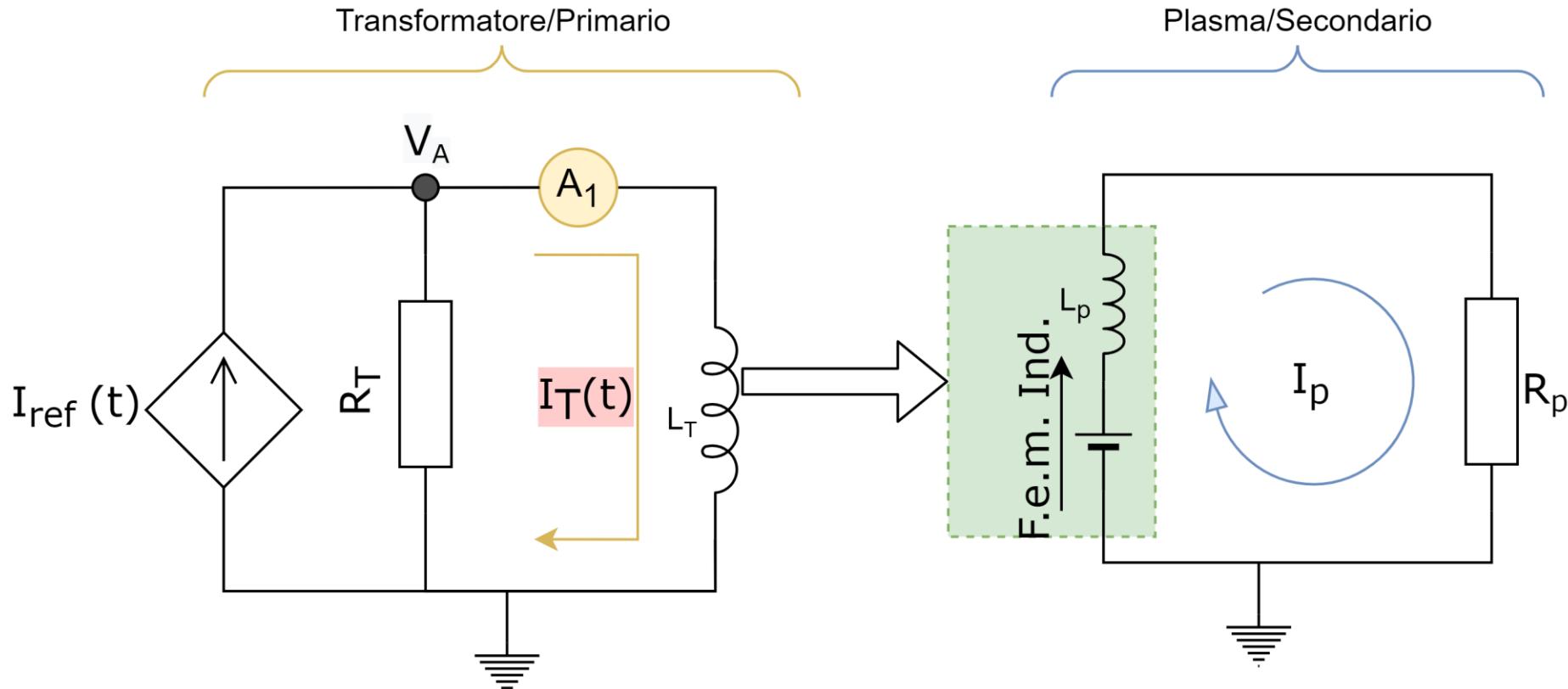
Circuito equivalente

Matematicamente è possibile modellare la dinamica della corrente **bobina - plasma** con la stessa dinamica un trasformatore ideale monofase



Semplificazione del circuito equivalente

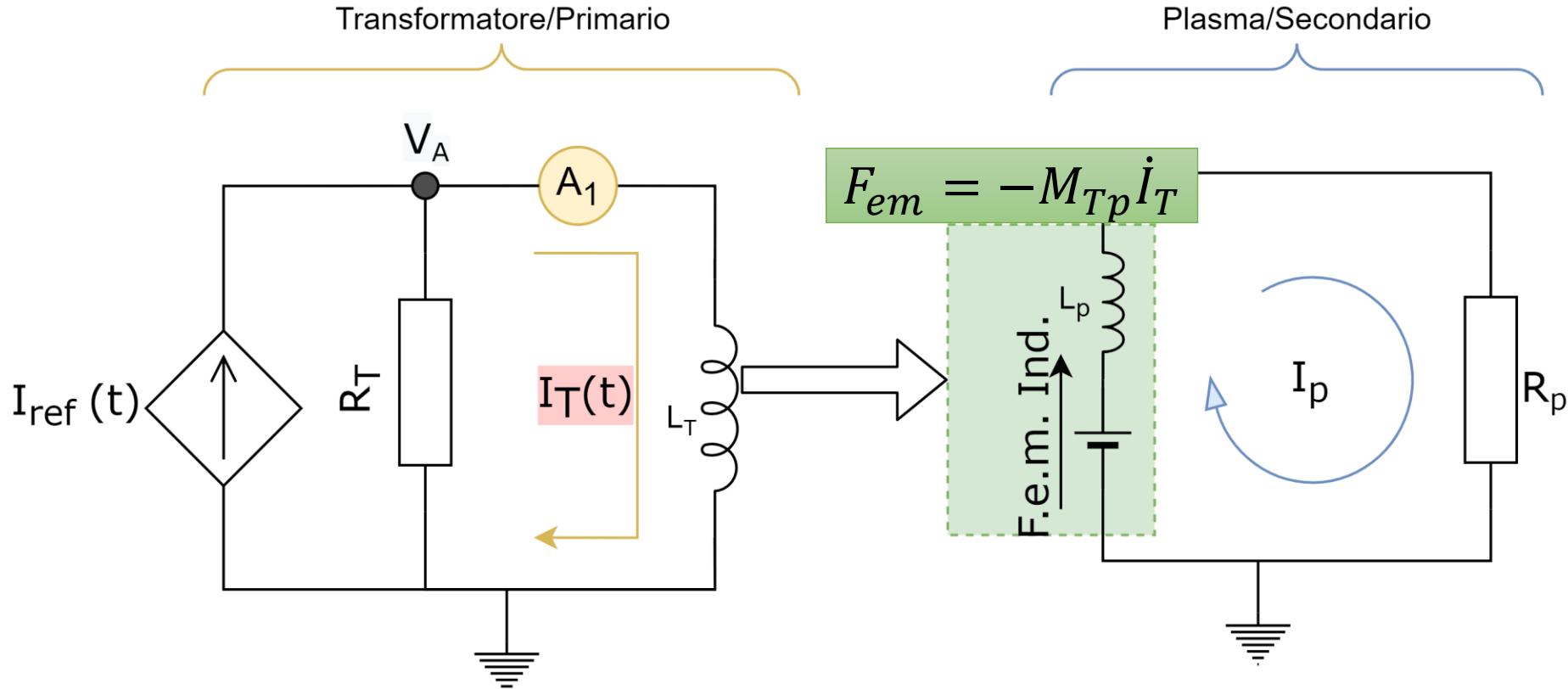
Negli impianti reali il primario è attuato da un generatore di corrente in retroazione, il ché permette di ignorare l'effetto di mutua induttanza tra il plasma \rightarrow bobina,



Quindi consideriamo solo l'effetto **bobina \rightarrow plasma**, modellando il controllo della corrente nel primario come un sistema lineare del 1 ordine con i suoi componenti equivalenti

Dal circuito alla dinamica

Usando la *prima e seconda legge di Kirchhoff* (*legge nodi e maglie*) e la *legge di Faraday* per la F_{em} indotta, siamo in grado di ottenere la dinamica istantanea del circuito.



$$I_{ref}(s) = \left(\frac{1}{R_T} + \frac{1}{sL_T} \right) \cdot V_A(s)$$

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

Funzione di trasferimento del plasma

Il modello costitutivo che descrive il secondario è:

$$\begin{cases} F_{em} = L_p \dot{I}_p + I_p R_p \\ F_{em} = -M_{Tp} \dot{I}_T \end{cases}$$

Funzione di trasferimento del plasma

Il modello costitutivo che descrive il secondario è:

$$\begin{cases} F_{em} = L_p \dot{I}_p + I_p R_p \\ F_{em} = -M_{Tp} \dot{I}_T \end{cases}$$

$$sI_p L_p + I_p R_p = -sM_{Tp} I_T \Rightarrow I_p(sL_p + R_p) = -sI_T M_{Tp} \Rightarrow$$

$$\frac{I_p(s)}{I_T(s)} = -\frac{sM_{tp}}{sL_p + R_p}$$

Funzione di trasferimento del primario

Come detto anche prima, il **primario** è attuato da un **controllo di corrente in feedback**, il modello riportato è quindi il suo modello equivalente a un sistema lineare del primo ordine, infatti:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{ref}(s) = \left(\frac{1}{R_T} + \frac{1}{sL_T} \right)^{-1} \cdot V_A(s) \\ I_T(s) = \frac{V_A(s)}{sL_T} \end{array} \right.$$

Funzione di trasferimento del primario

Come detto anche prima, il **primario** è attuato da un **controllo di corrente in feedback**, il modello riportato è quindi il suo modello equivalente a un sistema lineare del primo ordine, infatti:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{ref}(s) = \left(\frac{1}{R_T} + \frac{1}{sL_T} \right)^{-1} \cdot V_A(s) \\ I_T(s) = \frac{V_A(s)}{sL_T} \end{array} \right.$$

$$I_{ref}(s) = \left(\frac{sL_T + R_T}{sL_T R_T} \right) V_A(s) \Rightarrow V_A(s) = \frac{sL_T R_T}{sL_T + R_T} I_{ref}(s)$$

$$I_T(s) = \frac{sL_T R_T}{sL_T + R_T} I_{ref}(s) \cdot \frac{1}{sL_T} \Rightarrow I_T(s) = \frac{R_T}{sL_T + R_T} I_{ref}(s)$$

Funzione di trasferimento del primario

Come detto anche prima, il **primario** è attuato da un **controllo di corrente in feedback**, il modello riportato è quindi il suo modello equivalente a un sistema lineare del primo ordine, infatti:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{ref}(s) = \left(\frac{1}{R_T} + \frac{1}{sL_T} \right)^{-1} \cdot V_A(s) \\ I_T(s) = \frac{V_A(s)}{sL_T} \end{array} \right.$$

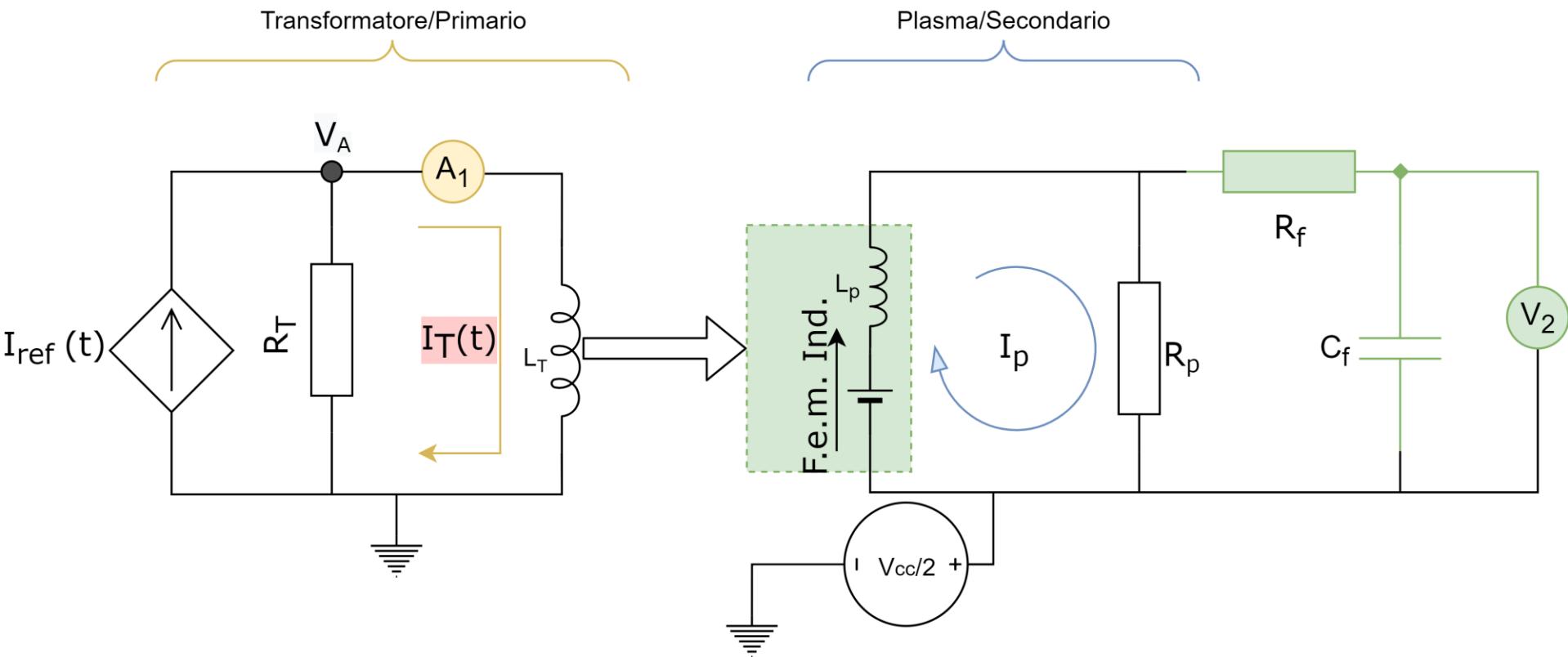
$$I_{ref}(s) = \left(\frac{sL_T + R_T}{sL_T R_T} \right) V_A(s) \Rightarrow V_A(s) = \frac{sL_T R_T}{sL_T + R_T} I_{ref}(s)$$

$$I_T(s) = \frac{sL_T R_T}{sL_T + R_T} I_{ref}(s) \cdot \frac{1}{sL_T} \Rightarrow I_T(s) = \frac{R_T}{sL_T + R_T} I_{ref}(s)$$

$$\frac{I_T(s)}{I_{ref}(s)} = \frac{R_T}{sL_T + R_T}$$

Nota: R_T e L_T sono dei parametri equivalenti per esprimere la dinamica equivalente del controllore in feedback di corrente

Parametri misurati



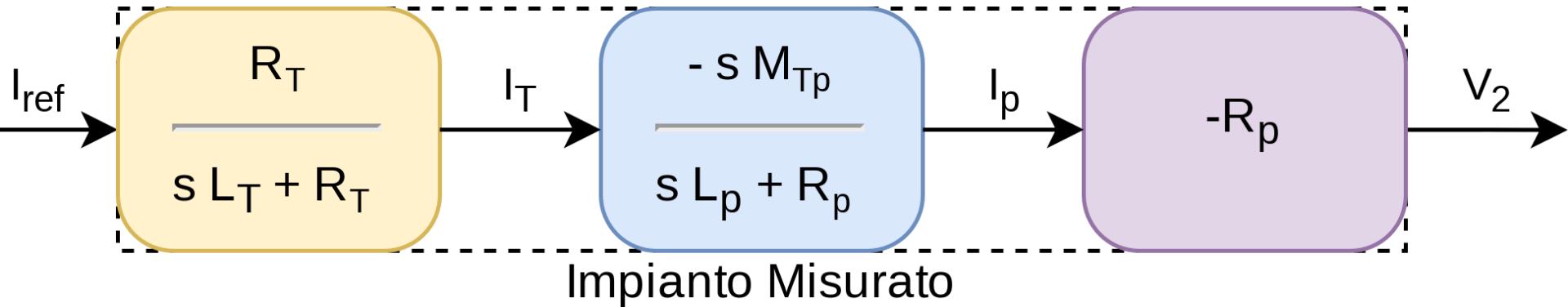
Per questo progetto si è scelto di misurare la *CORRENTE DI PLASMA* attraverso il suo campo elettrico. Dall'equazione della dinamica abbiamo che, nel caso in cui la corrente di Plasma sia costante, allora $F_{em} = R_p I_p$.

Usiamo quindi la Tensione V_2 che rappresenta il campo elettrico del plasma.

Funzione di trasferimento complessiva

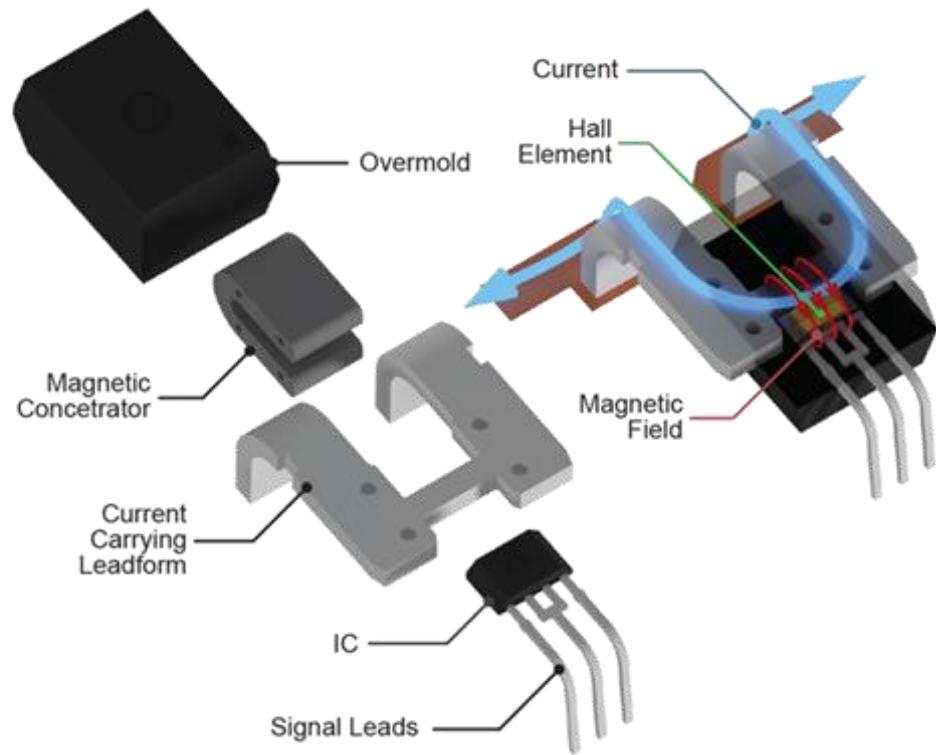
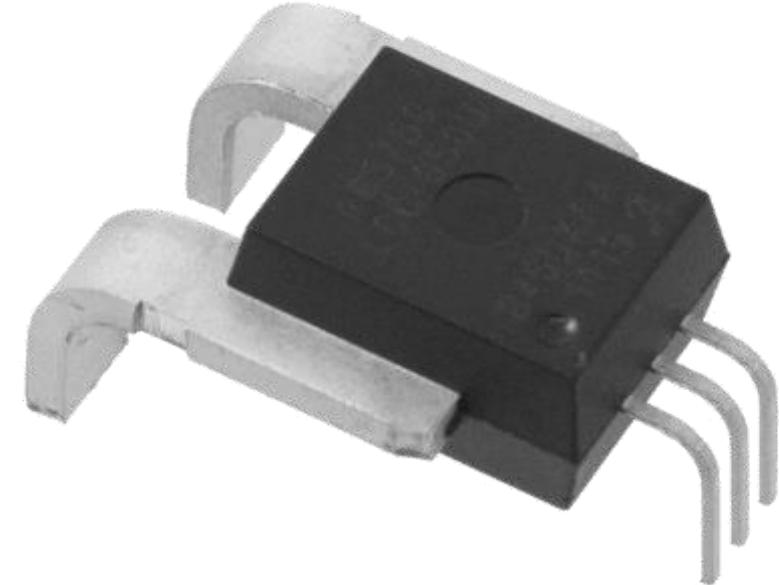
Unendo insieme i 3 tasselli otteniamo la funzione di trasferimento complessiva

$$\frac{V_2(s)}{I_{ref}(s)} = \frac{sM_{Tp}R_T R_p}{(sL_T + R_T)(sL_p + R_p)}$$

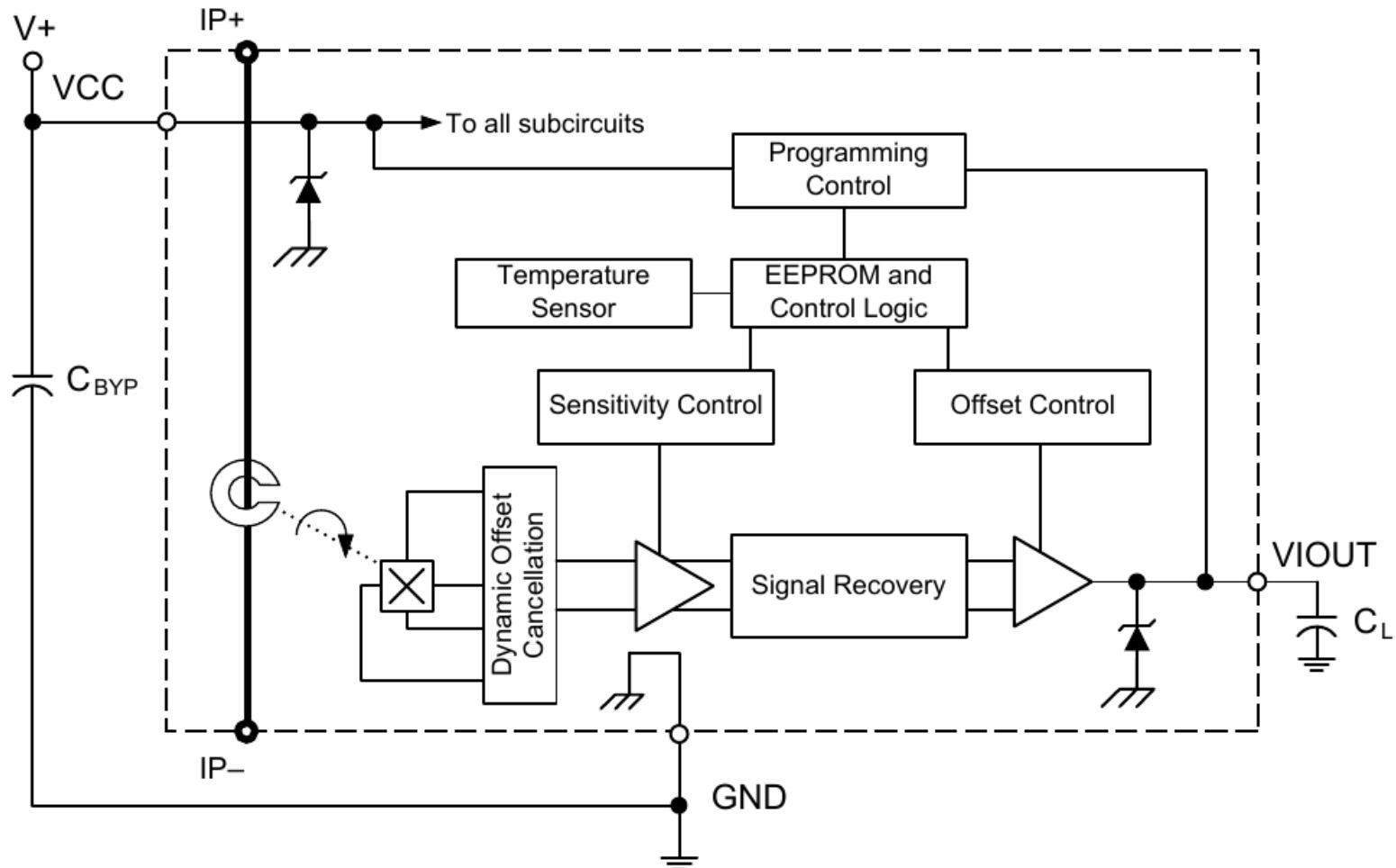


Trasduttore di corrente

Per la misura della corrente usiamo un Allegro, High-Precision Linear Current Sensor



Trasduttore di corrente, schema interno:



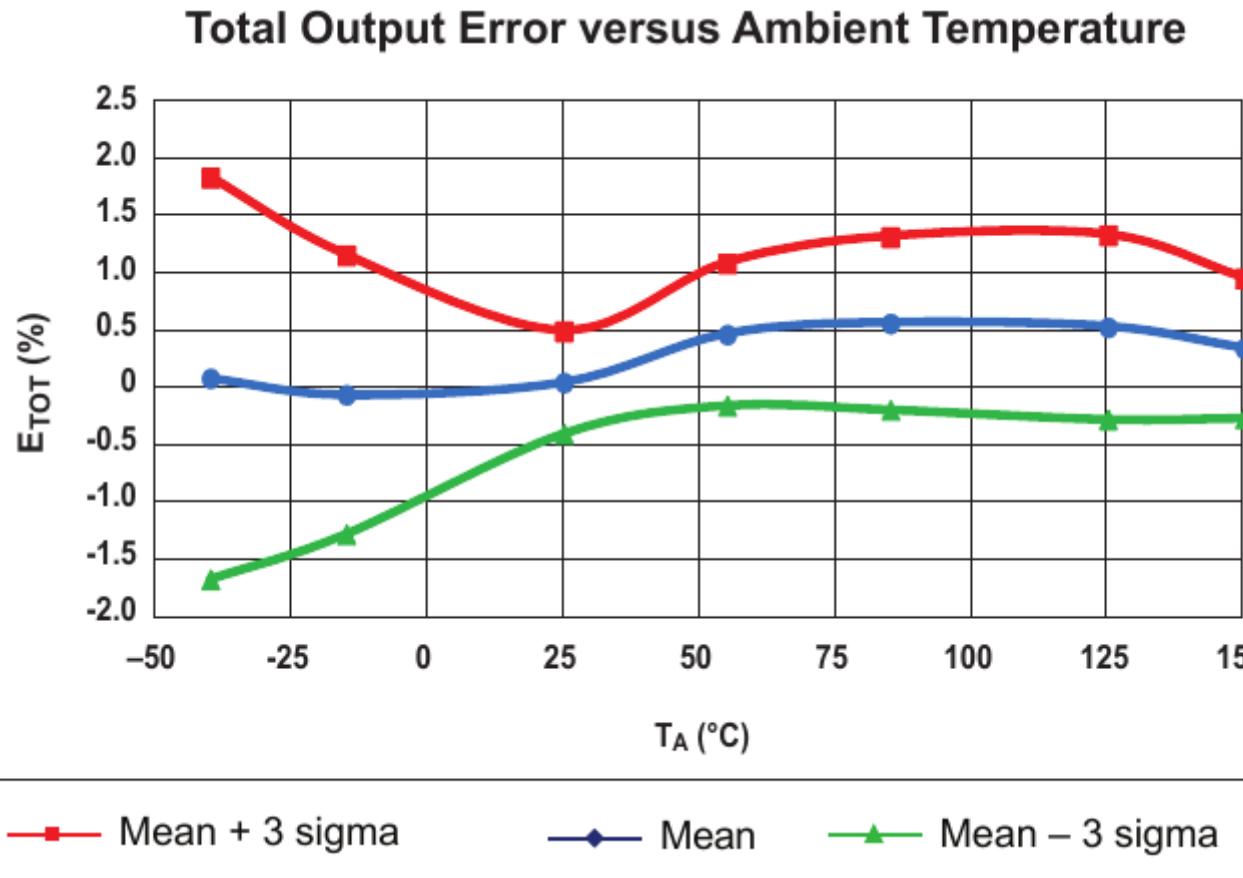
Functional Block Diagram

Trasduttore di corrente, caratteristiche chiave:

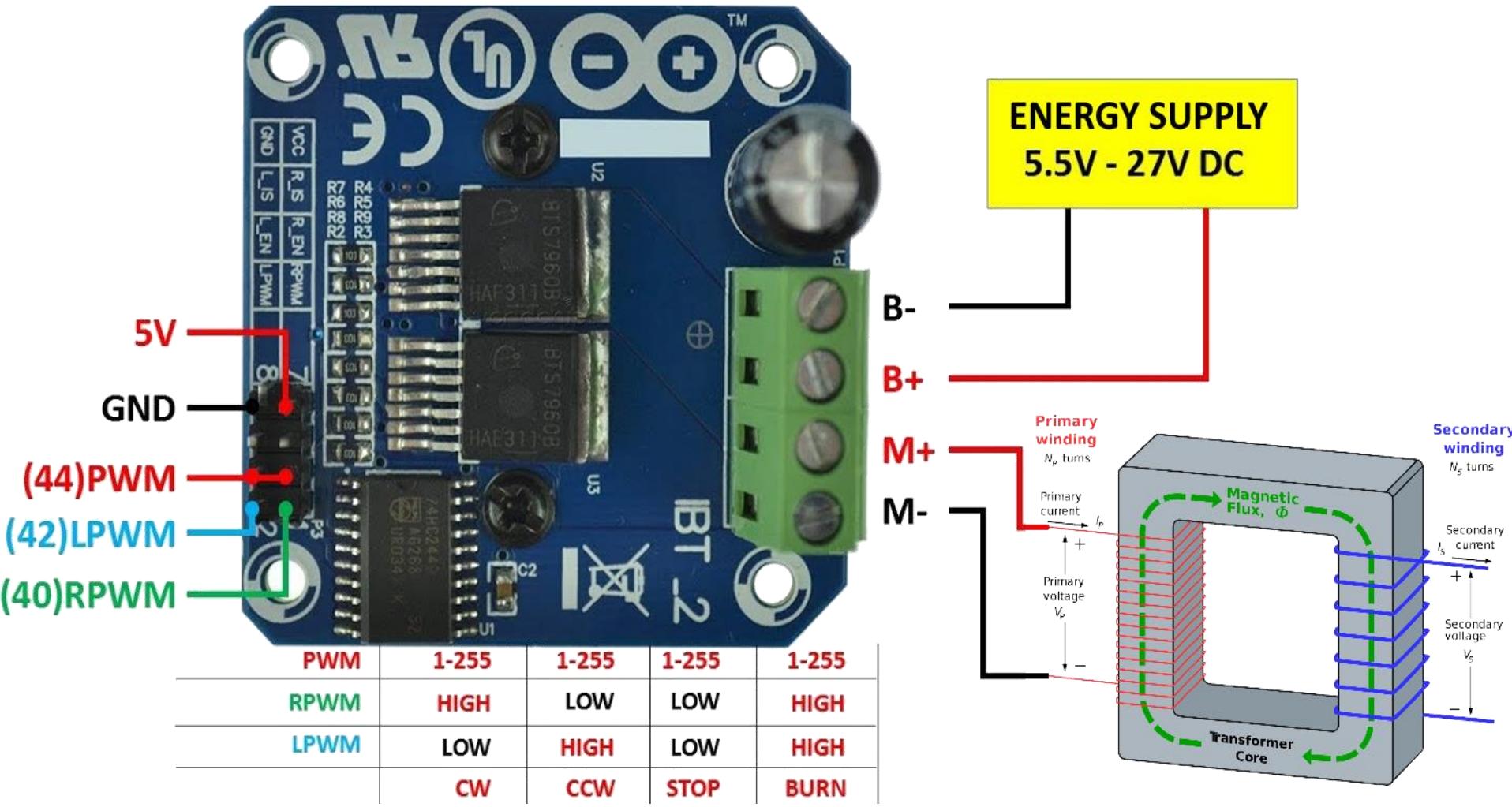
Bandwidth	120 kHz
Output rise time	4.1 s
Ultralow power loss	$100\mu\Omega$ Resistenza interna
Single supply operation	4.5 to 5.5 V
Primary sampled current	± 100 A
Sensitivity sens (Typ.)	20(mV/A)
Current directionality	Bidirectional
T_{OP}	-40 to 150 ($^{\circ}\text{C}$)

Sensore di misura di corrente a effetto Hall

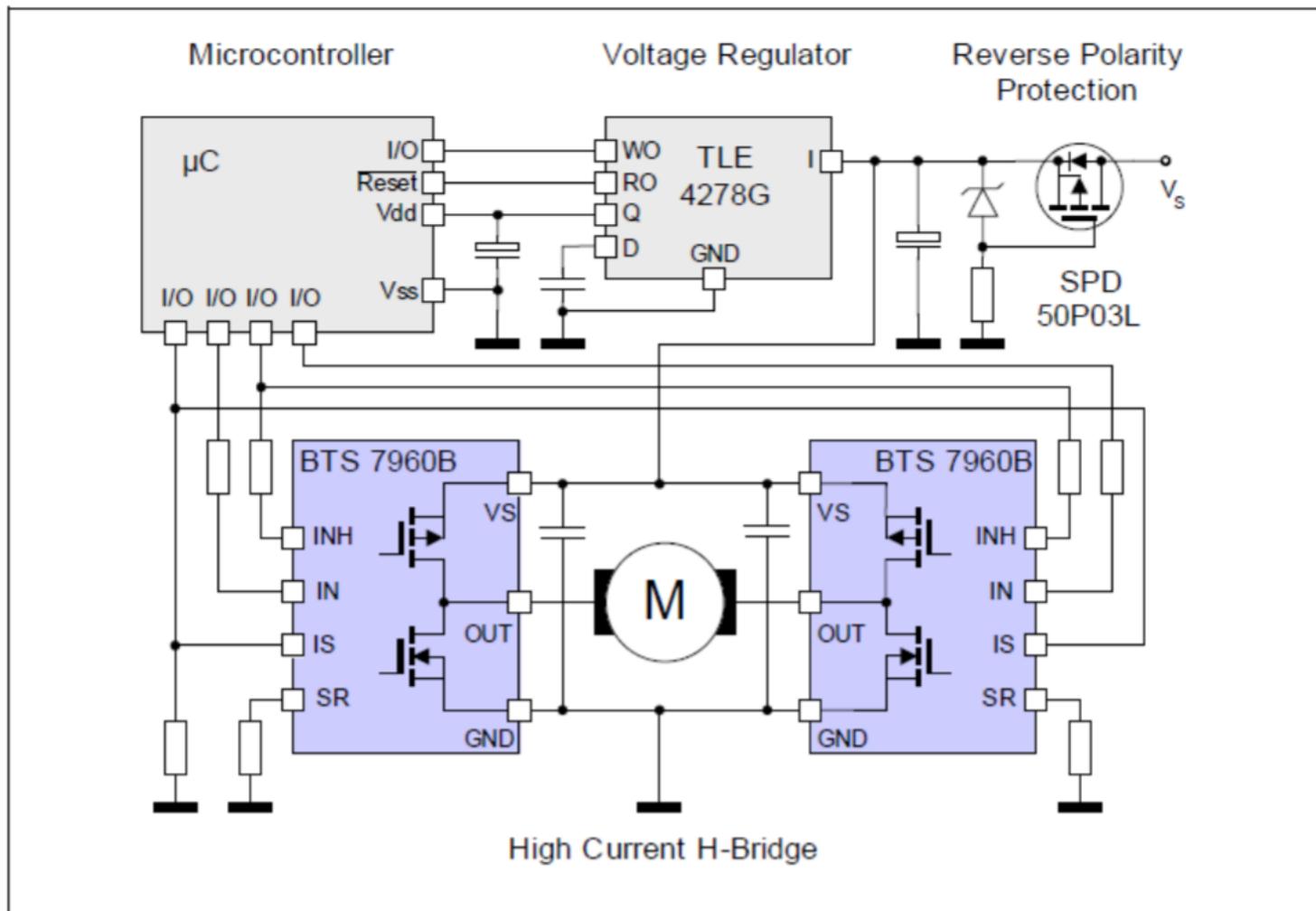
Trasduttore di corrente, non linearità:



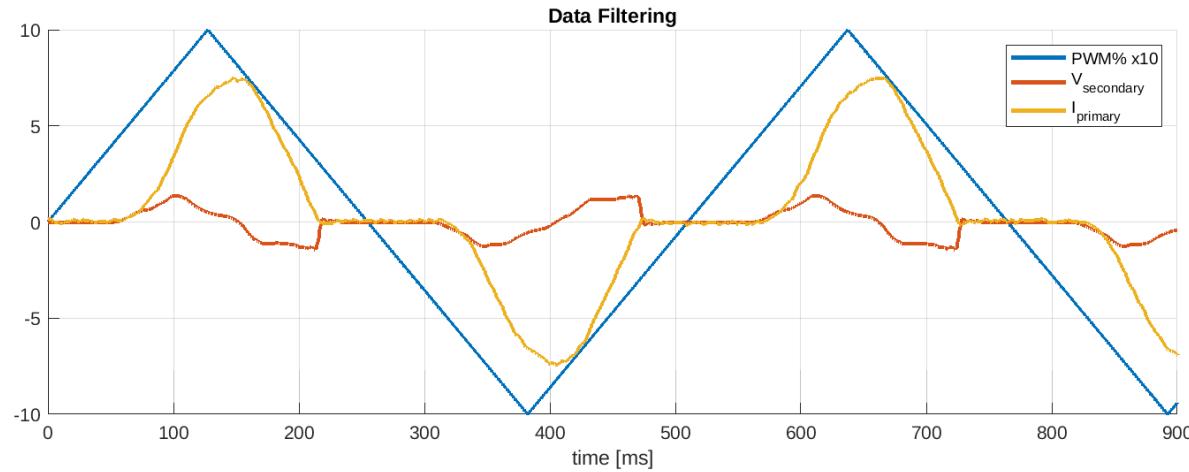
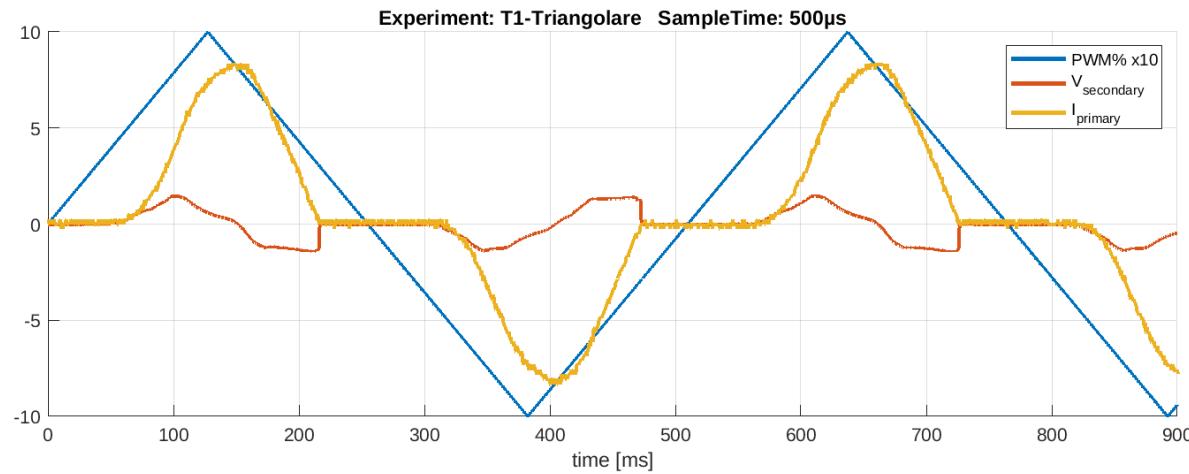
Driver di corrente - IBT-2



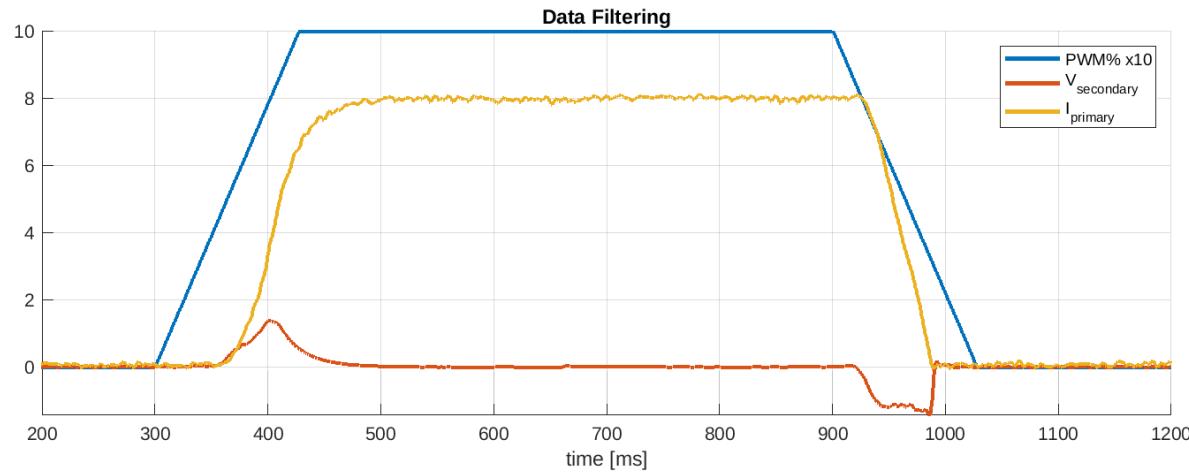
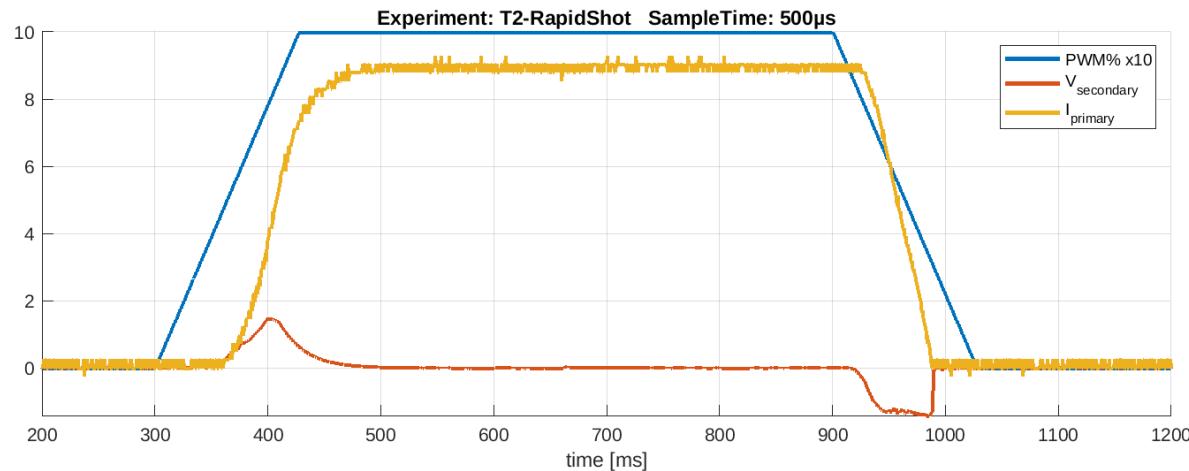
Driver di corrente - IBT-2, schema interno:



Driver di corrente - IBT-2, Dead-zone:



Driver di corrente - IBT-2, Dead-zone:



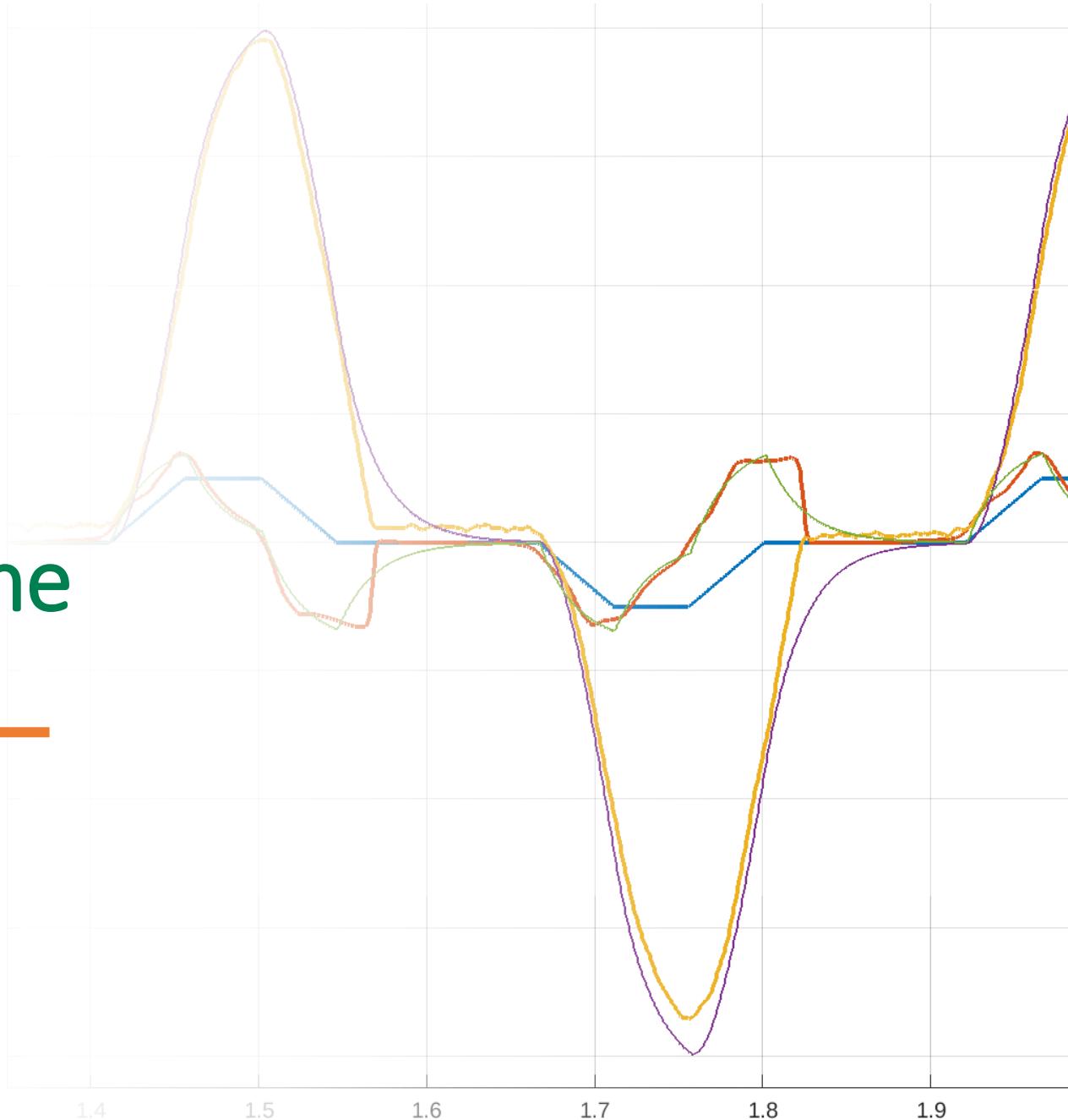
Driver di corrente - IBT-2, Dead-zone:

Riassumendo, il driver è caratterizzato da una Dead-zone sia **SUPERIORE** che **INFERIORE**

Dead-zone Inferiore	Dead-zone Superiore
120 PWM	220 PWM

Essa viene quindi eliminata nel software di controllo, che lavorerà quindi solo con PWM nel range [120, 220]

Identificazione del modello



Identificazione automatica

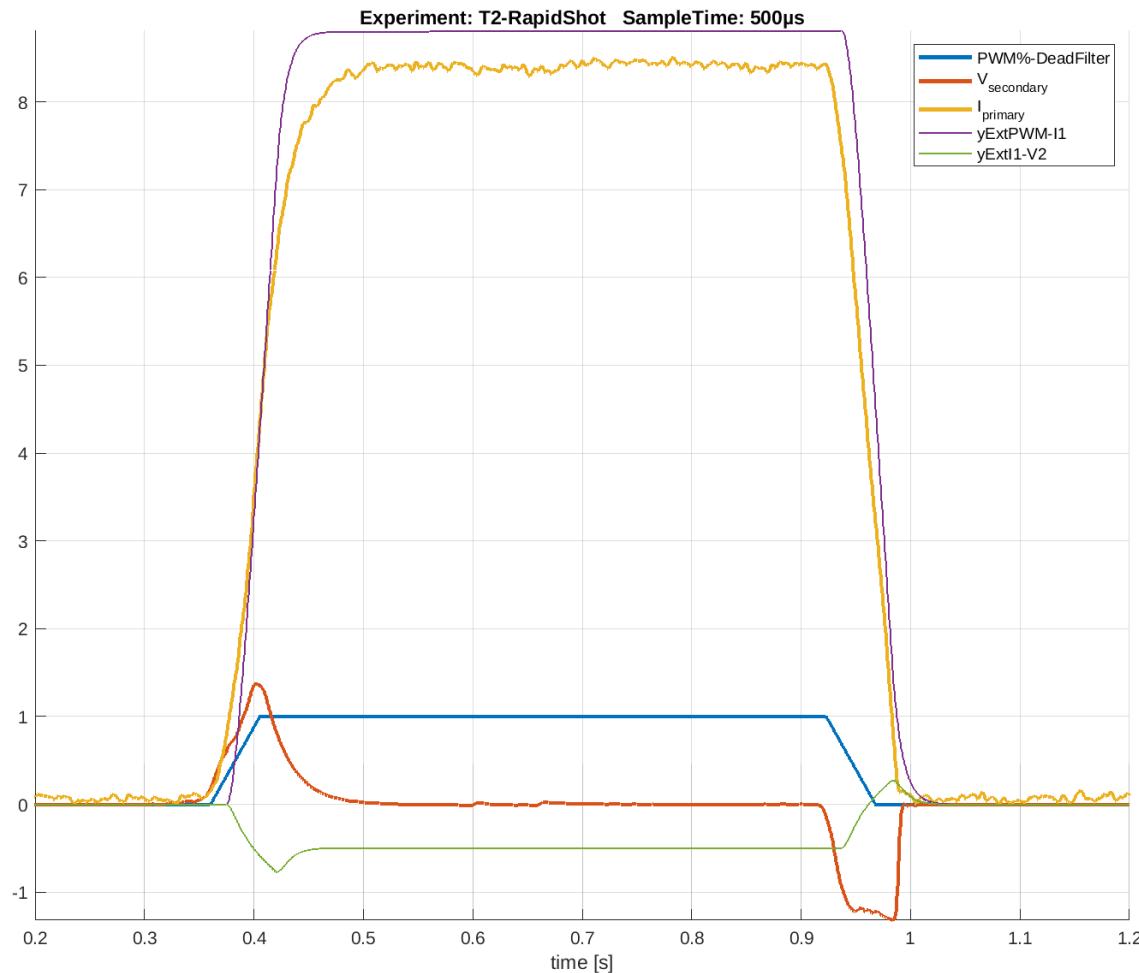
Mediante la libreria:

«System Identification Toolbox»

Integrata all'interno di Matlab sono stati stimati i parametri delle funzioni di trasferimento usando in ingresso un onda trapezoidale.

Sono mostrati gli esiti:

- Corrente del primario
- Tensione secondario

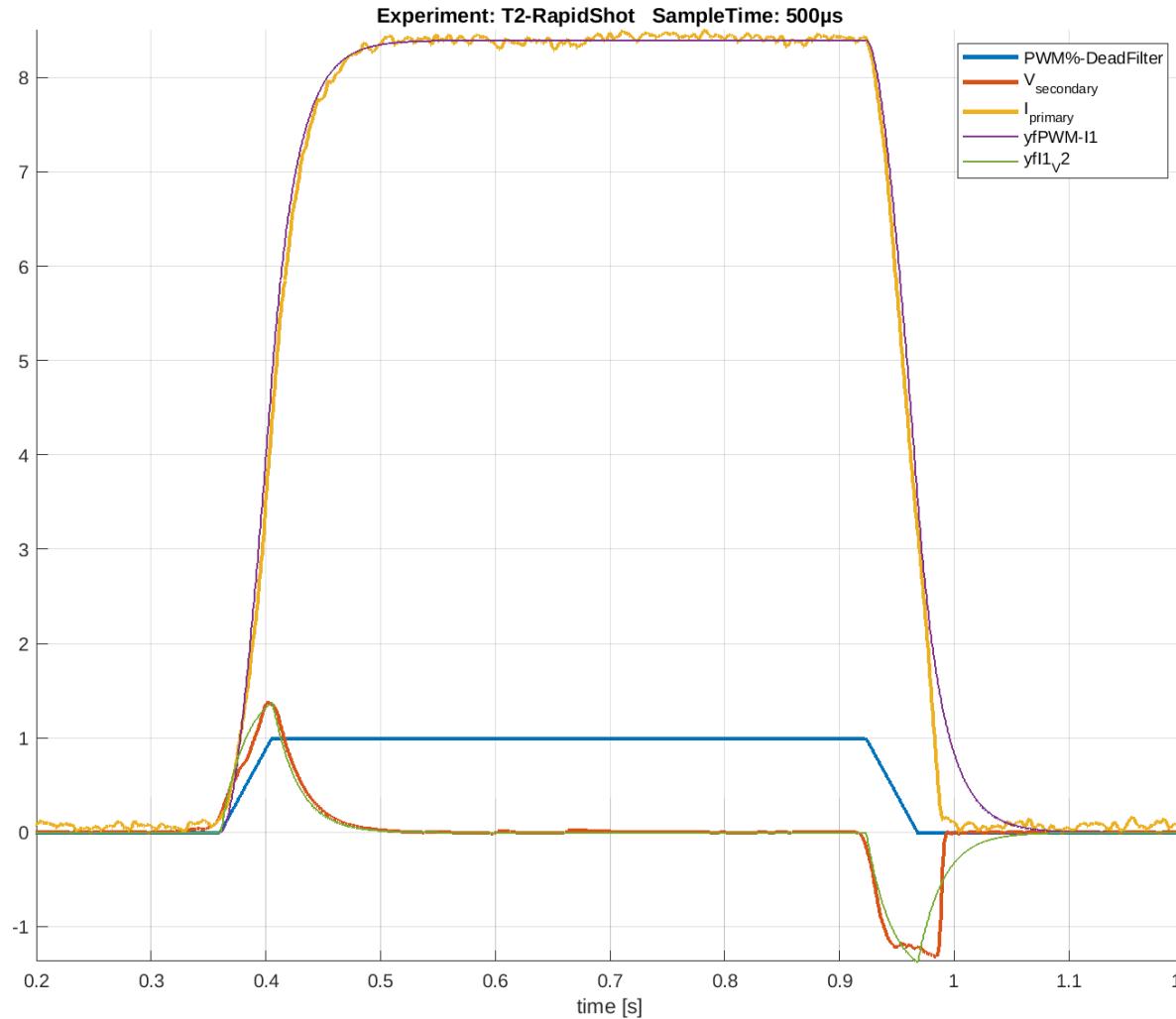


Identificazione manuale

Partendo dalle stime automatiche viste precedentemente, mediante un lavoro di tuning dei parametri si è calcolato un modello più aderente alla realtà

Sono mostrati gli esiti:

- Corrente del primario
- Tensione secondario



Funzioni di trasferimento stimate

$$\frac{I_T(s)}{PWM(s)} = \frac{8,4}{0,022s + 1}$$

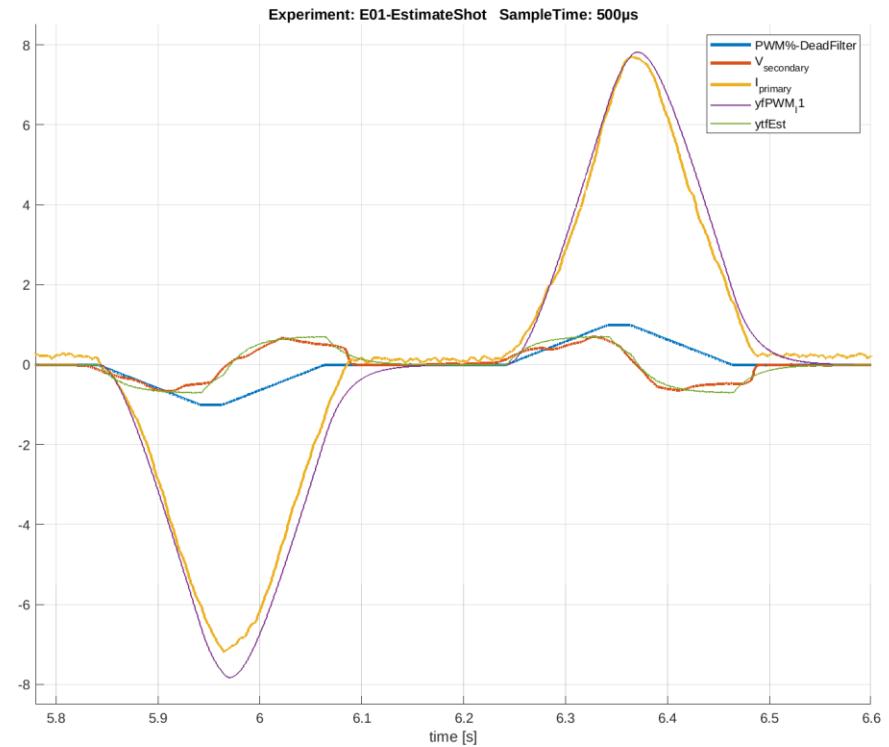
$$\frac{V_2(s)}{I_T(s)} = \frac{8,5 \times 10^{-3}s}{3,6 \times 10^{-4}s + 1}$$

$$\frac{V_2(s)}{PWM(s)} = \frac{9,1 \times 10^3 s}{s^2 + 2,8 \times 10^{-3}s + 1,3 \times 10^5}$$

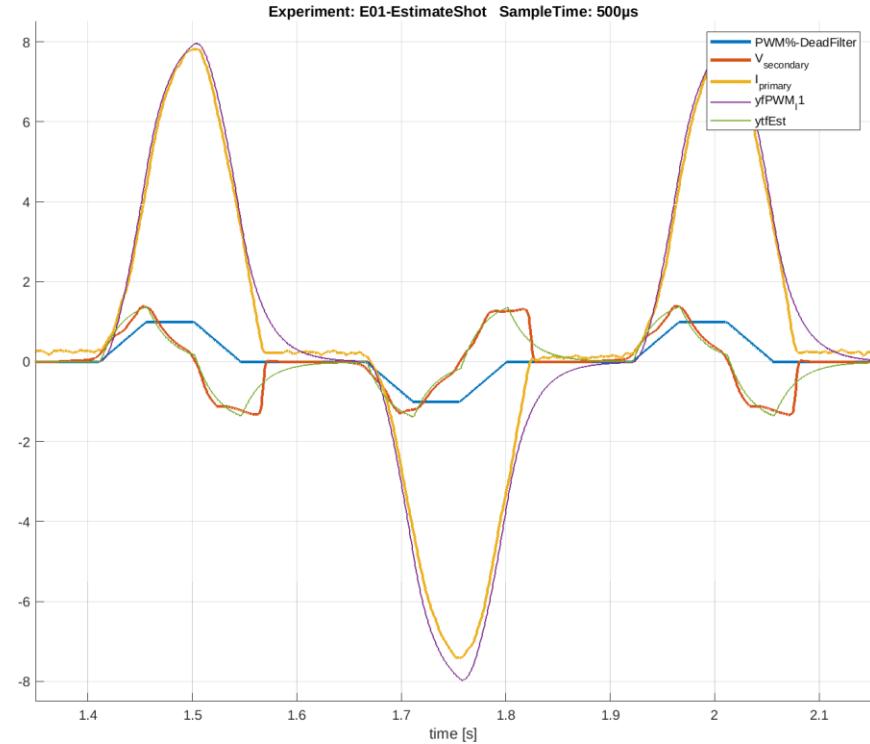
I parametri possono essere riassunti come:

- $K_p = 9,1 \times 10^3$
- $z_1 = 0$
- $s_1 \approx -2752,77$
- $s_2 \approx -47,2251$

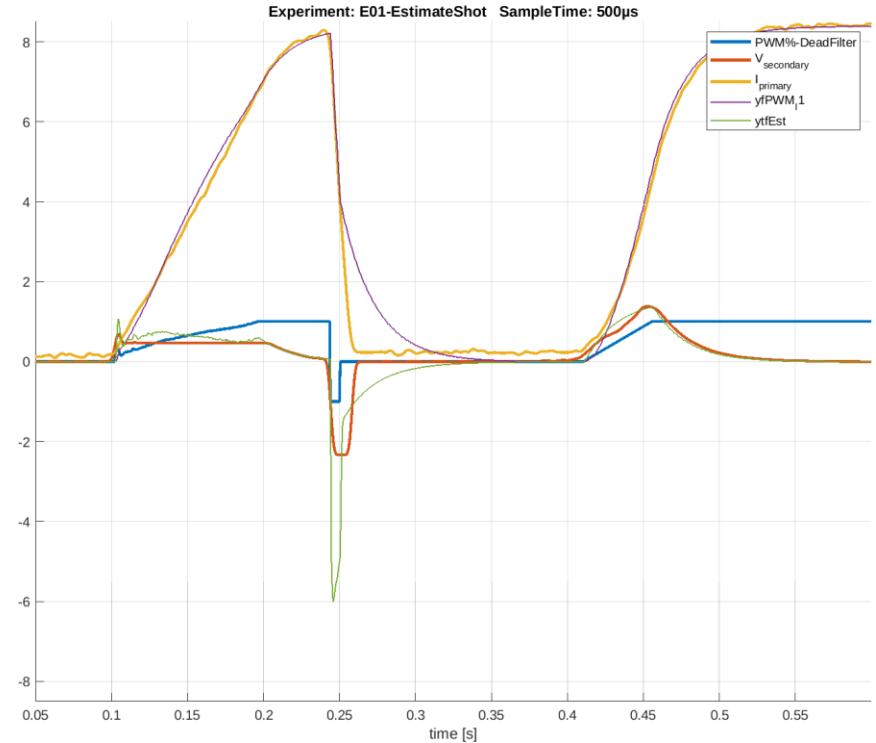
Test 1



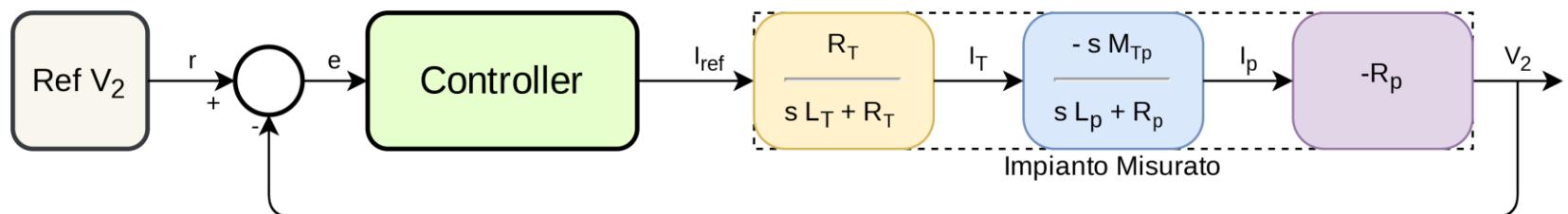
Test 2



Test 3

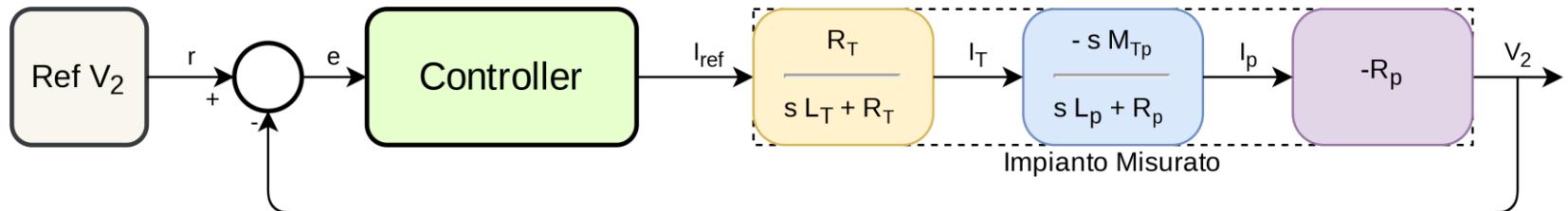


Sviluppo del controllore



Obiettivi di controllo

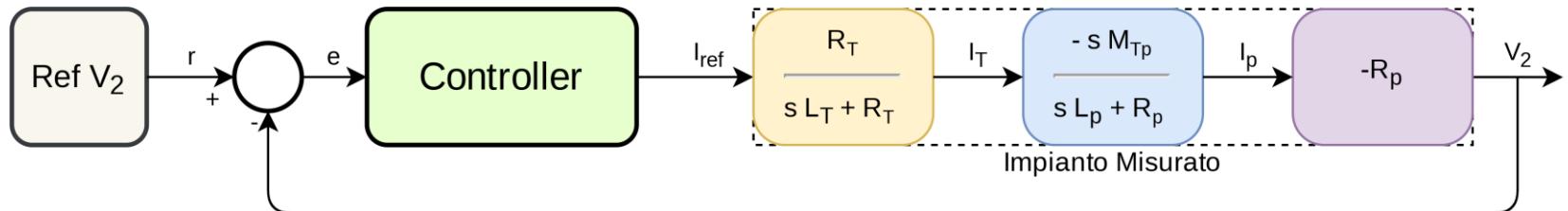
Inseguimento asintotico di segnali costanti per l'uscita V_2



Obiettivi di controllo

Inseguimento asintotico di segnali costanti per l'uscita V_2

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



Controllore «PID-STYLE»

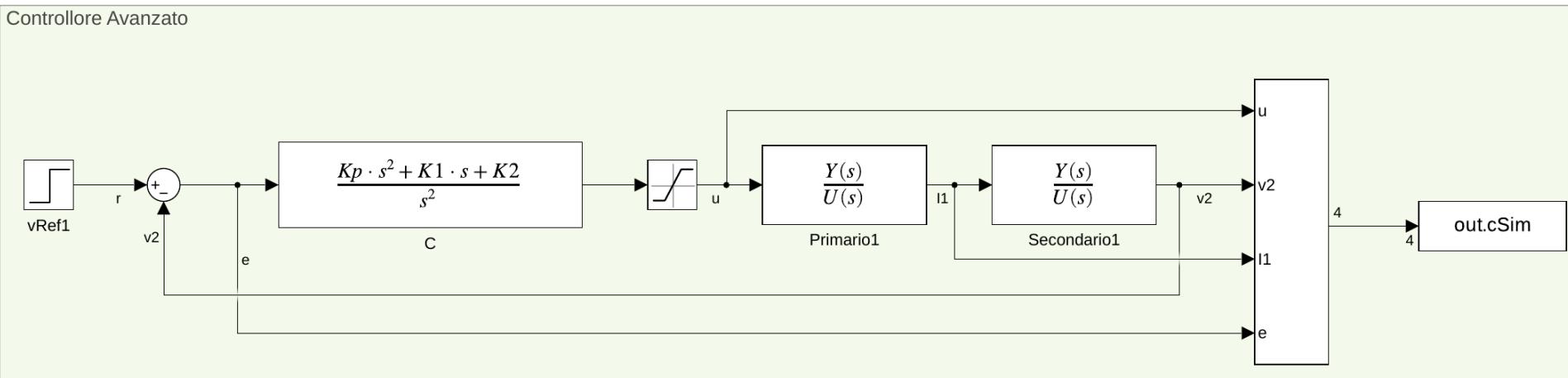
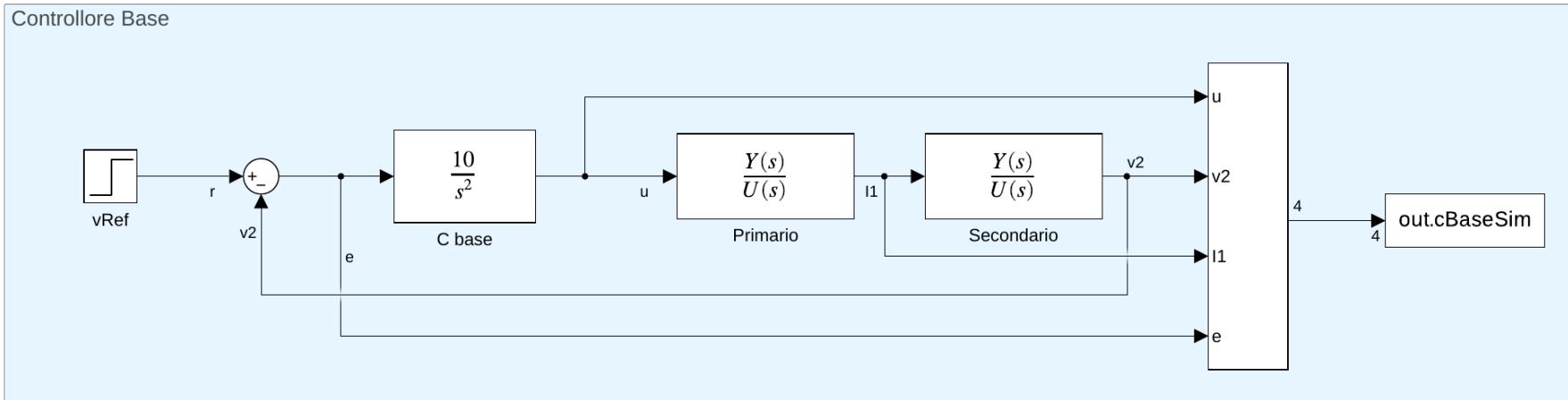
Dopo uno studio teorico, risulta che il controllore deve possedere 2 poli nell'origine

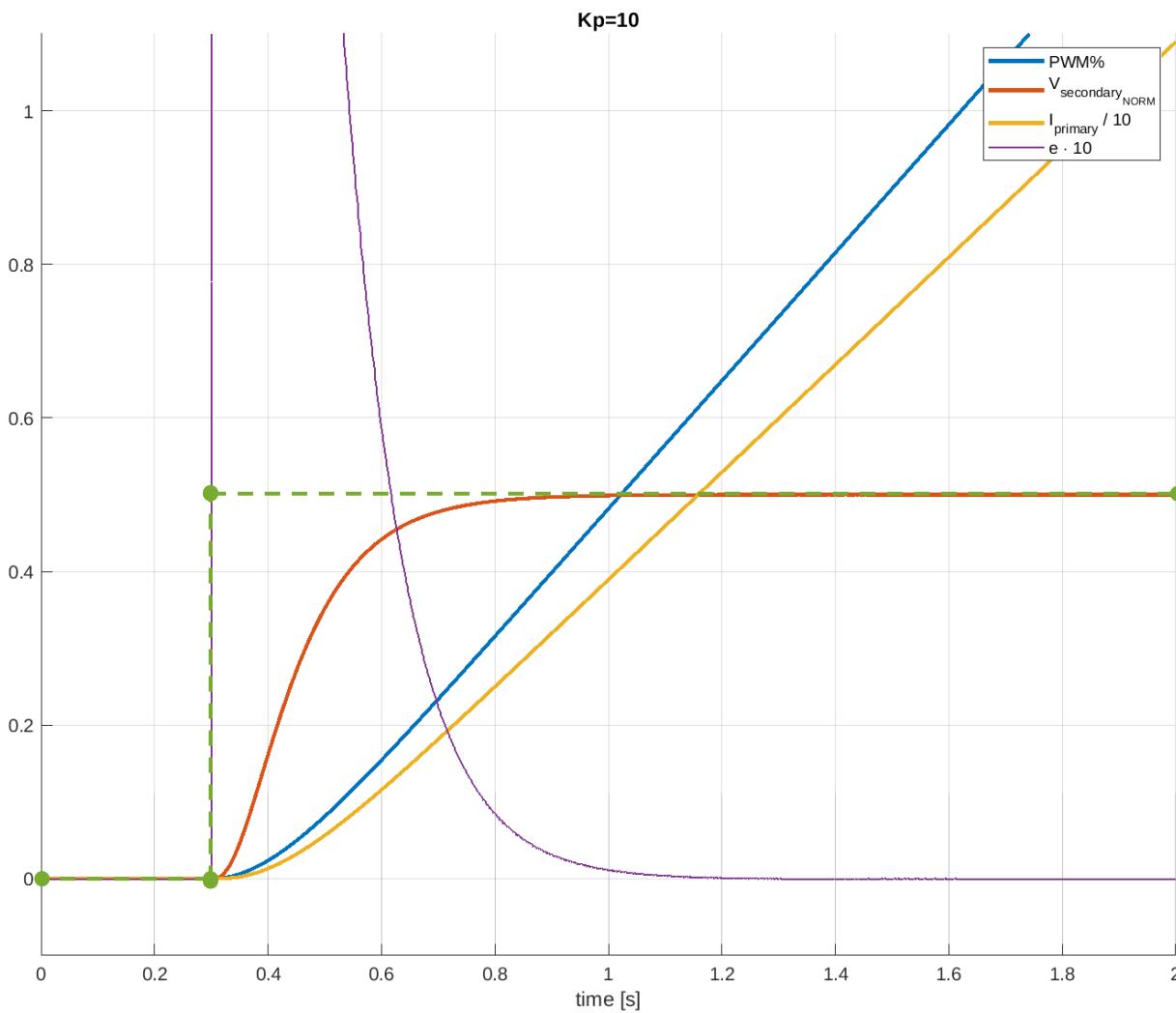
Il design del controllore da noi proposto è quindi:

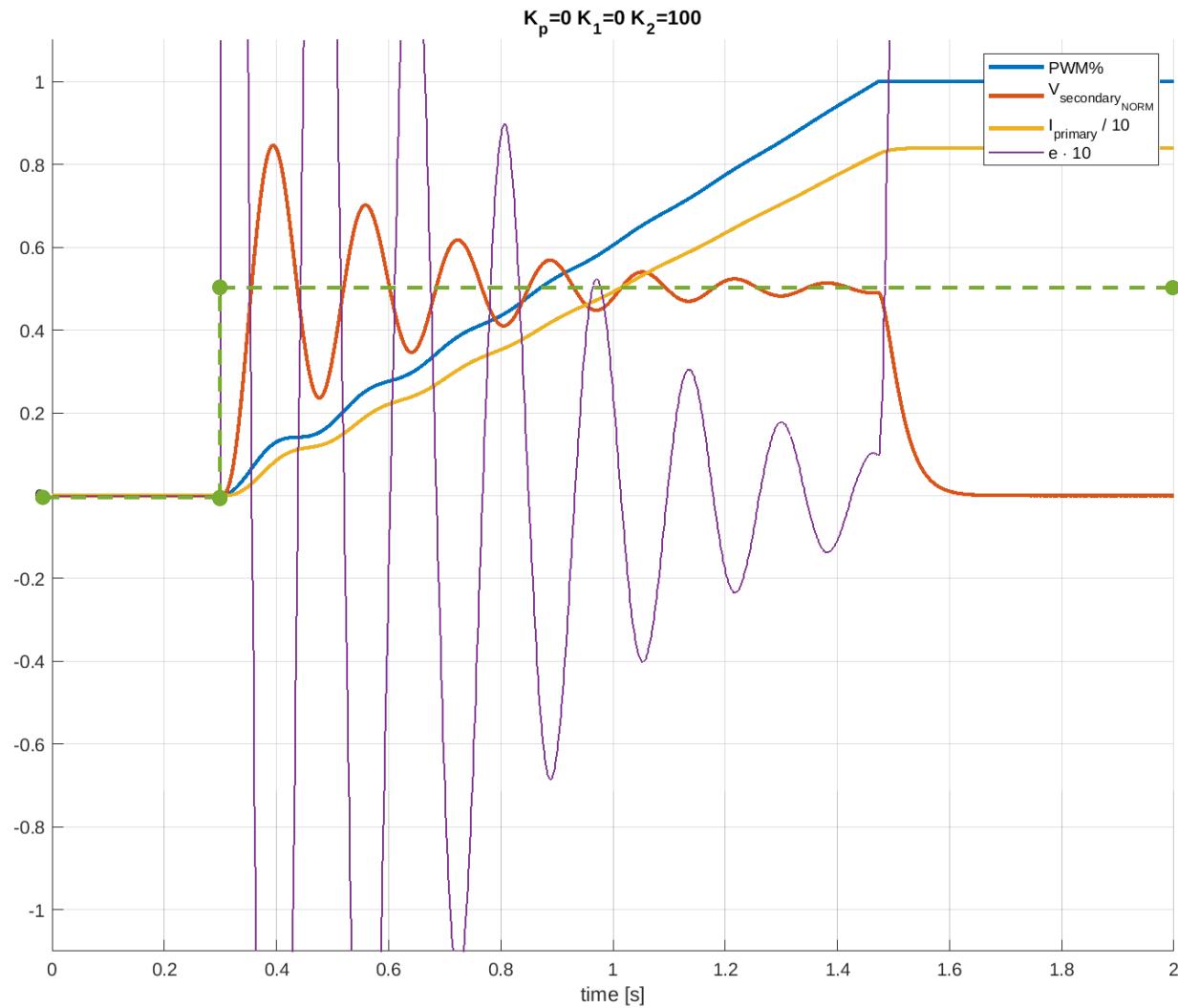
$$C(s) = \frac{K_2}{s^2} + \frac{K_1}{s} + K_p = \frac{K_2 + sK_1 + s^2K_p}{s^2}$$

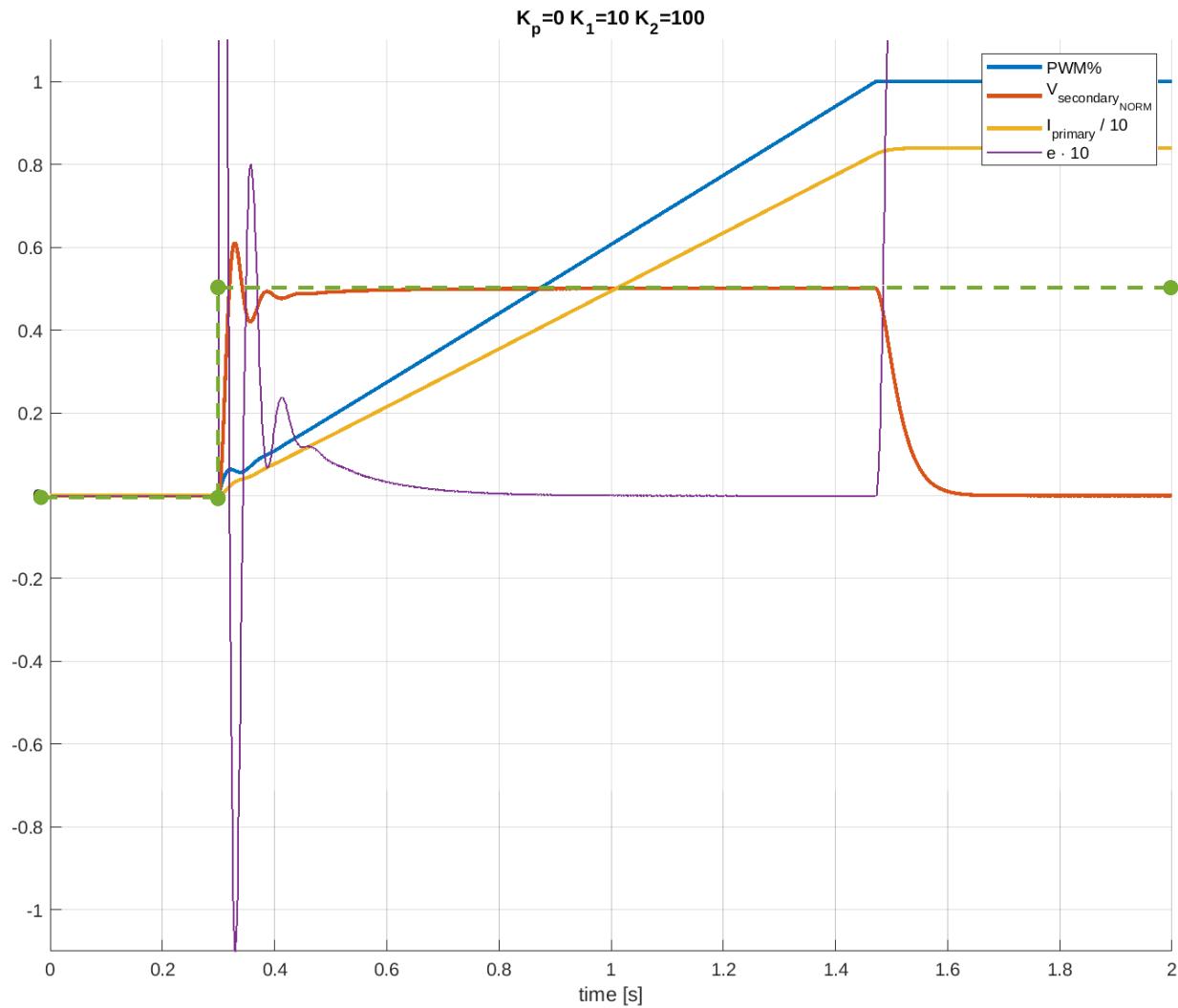
Analisi qualitativa con Simulink

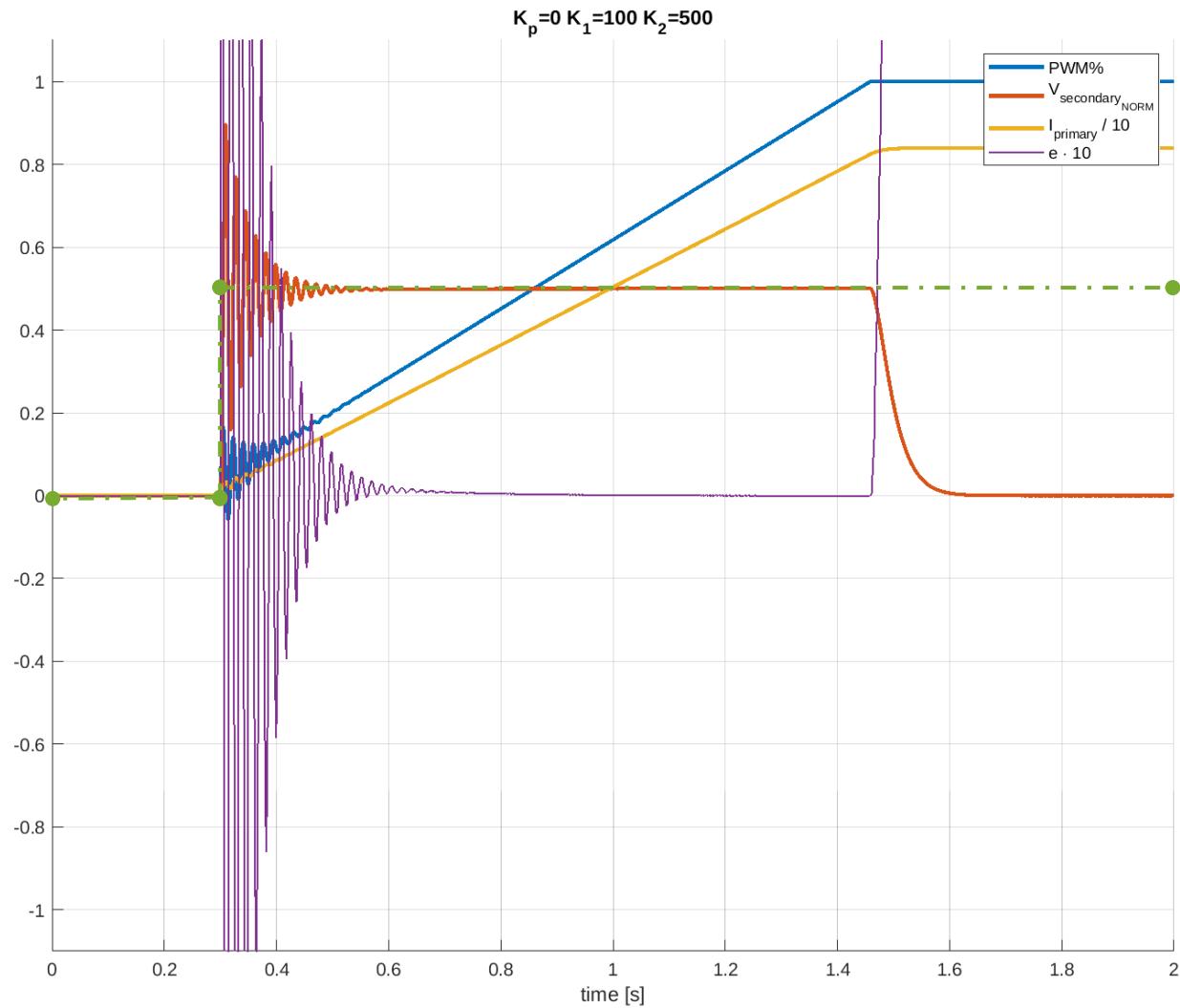
Analizziamo ora come i termini del controllore proposto contribuiscono alla dinamica sul modello stimato precedentemente.

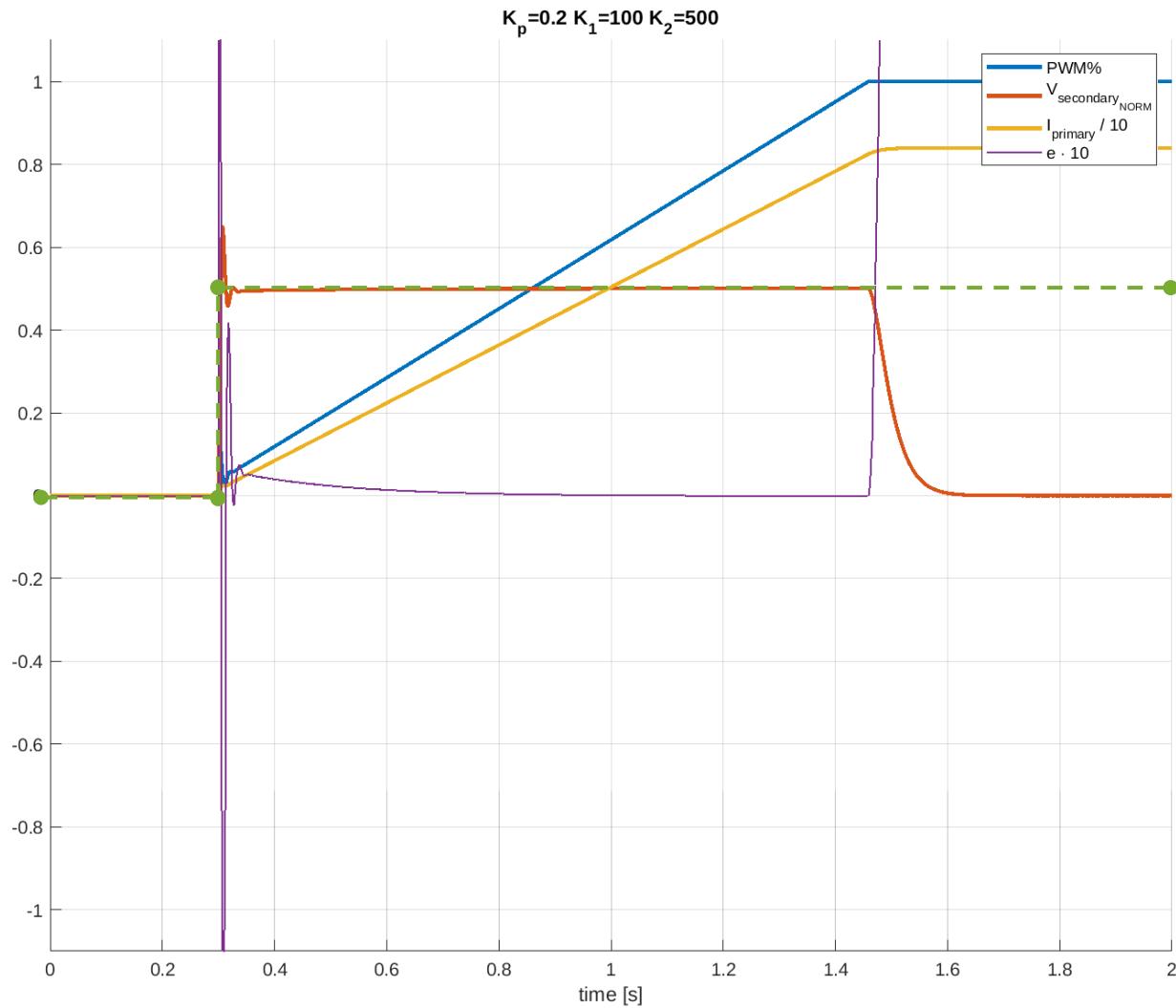


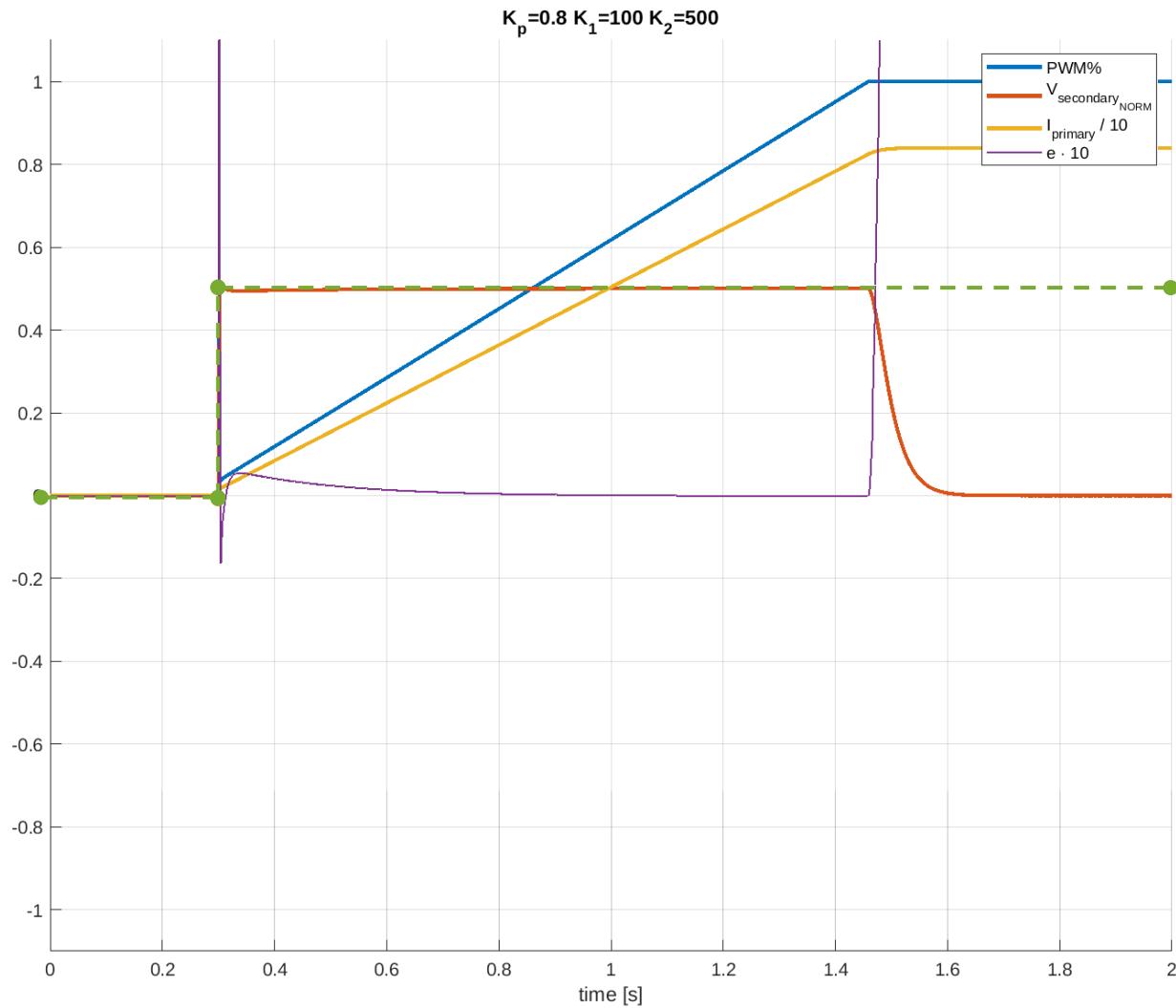




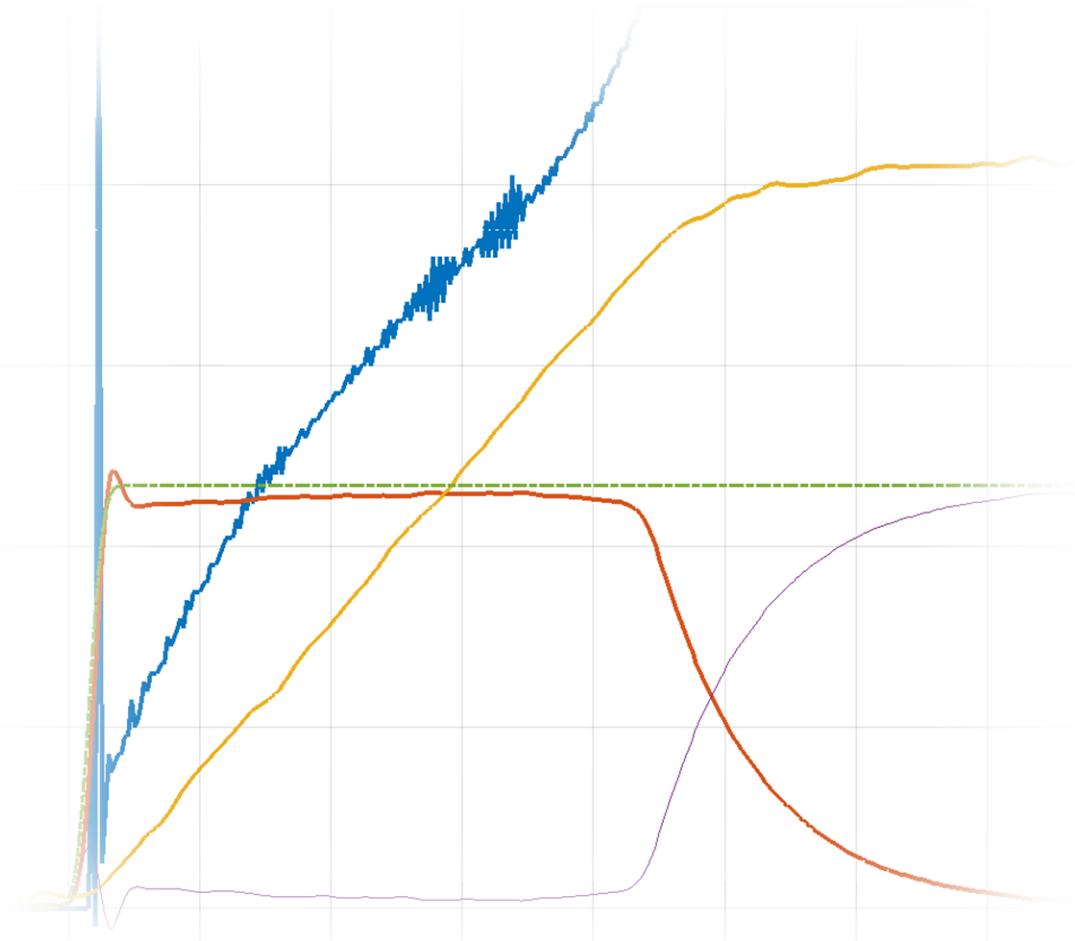






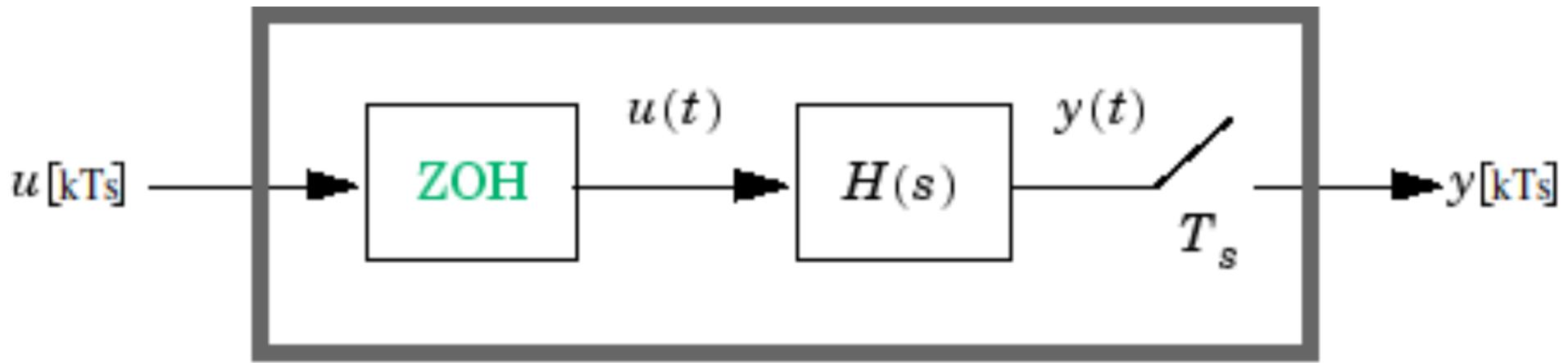


Risultati Sperimentali

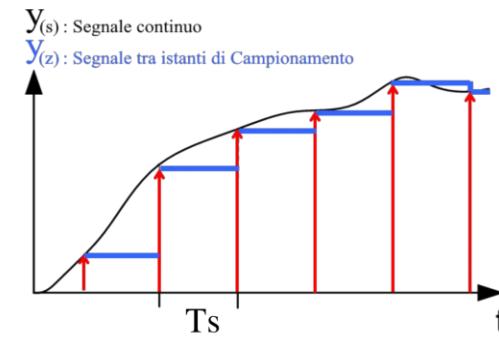
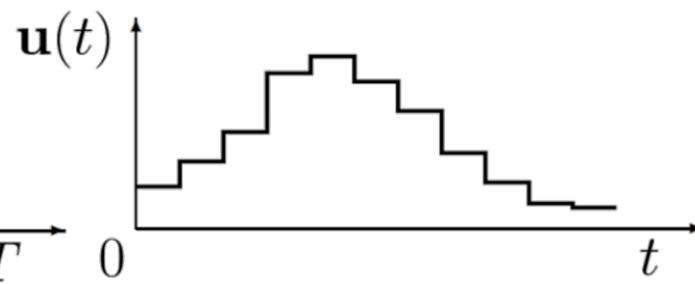
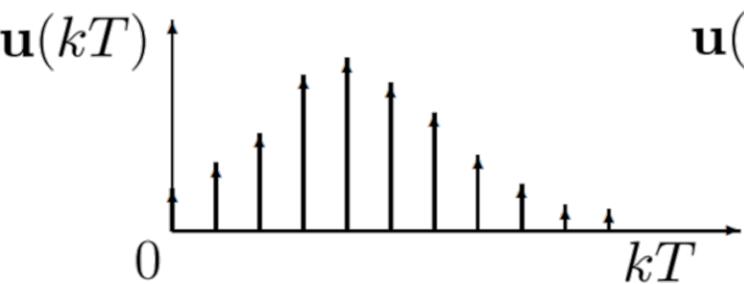


Da tempo continuo a tempo discreto

Mediante una discretizzazione Zero Order Hold (ZOH), otteniamo il controllore equivalente a tempo discreto



$$H_d(z)$$



ZOH discretizzazione

$$C_{I^2}(s) = \frac{K_2}{s^2}$$

$$\begin{cases} \dot{x} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} x + \begin{pmatrix} 0 \\ K_2 \end{pmatrix} u \\ y = \begin{pmatrix} 1 & 0 \end{pmatrix} x \end{cases}$$

$$C_I(s) = \frac{K_1}{s}$$

$$\begin{cases} \dot{x} = x + K_1 \cdot u \\ y = x \end{cases}$$

$$C_p(s) = K_p$$

$$\begin{cases} x^+ = \begin{pmatrix} 1 & T_s \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot x_k + K_2 \begin{pmatrix} T_s^2/2 \\ T_s \end{pmatrix} u_k \\ y_k = \begin{pmatrix} 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot x_k \end{cases}$$

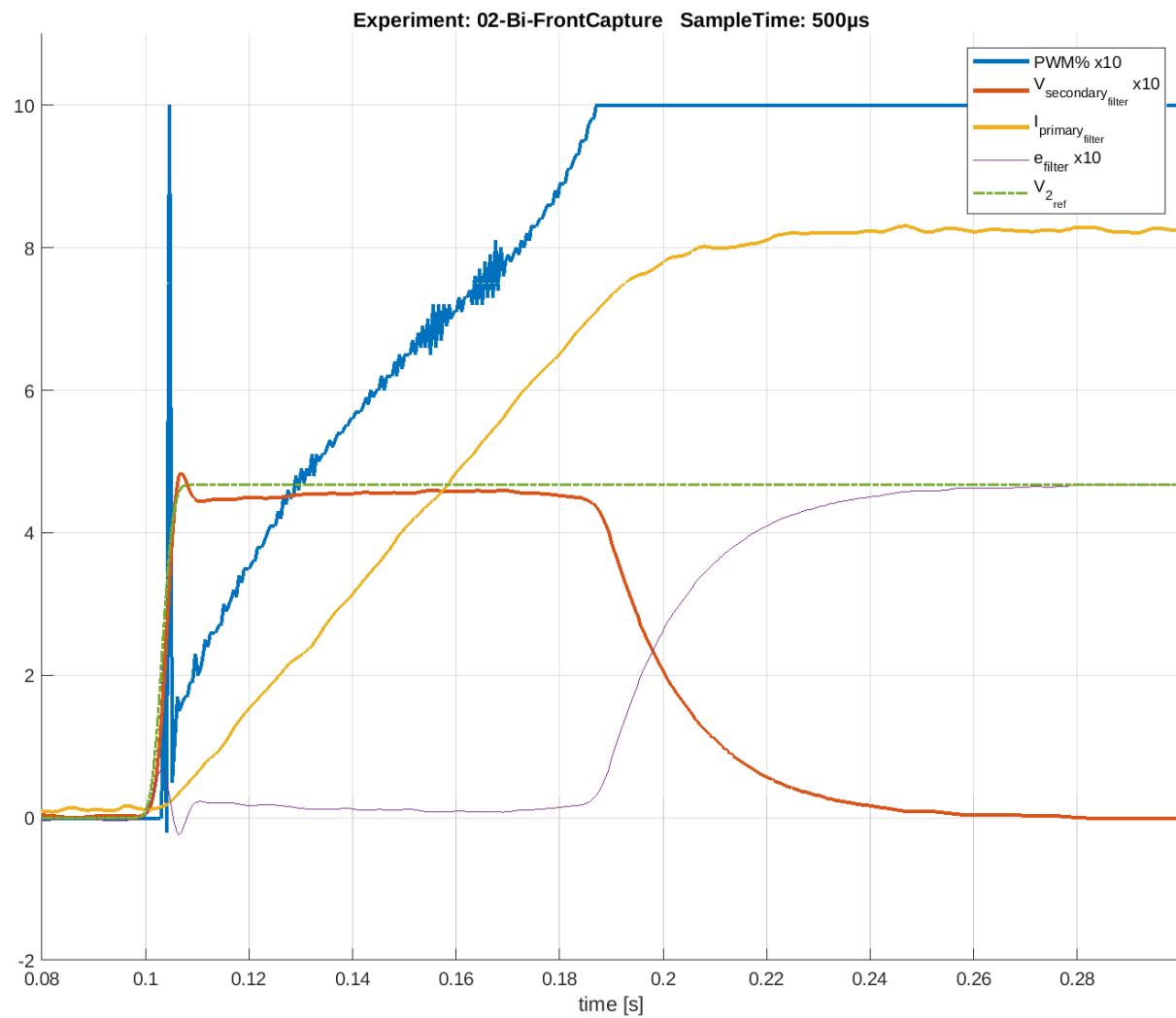
$$C_{I^2}(z)|_{T_s} = K_2 \cdot \frac{T_s}{2} \cdot \frac{z+1}{(z-1)^2}$$

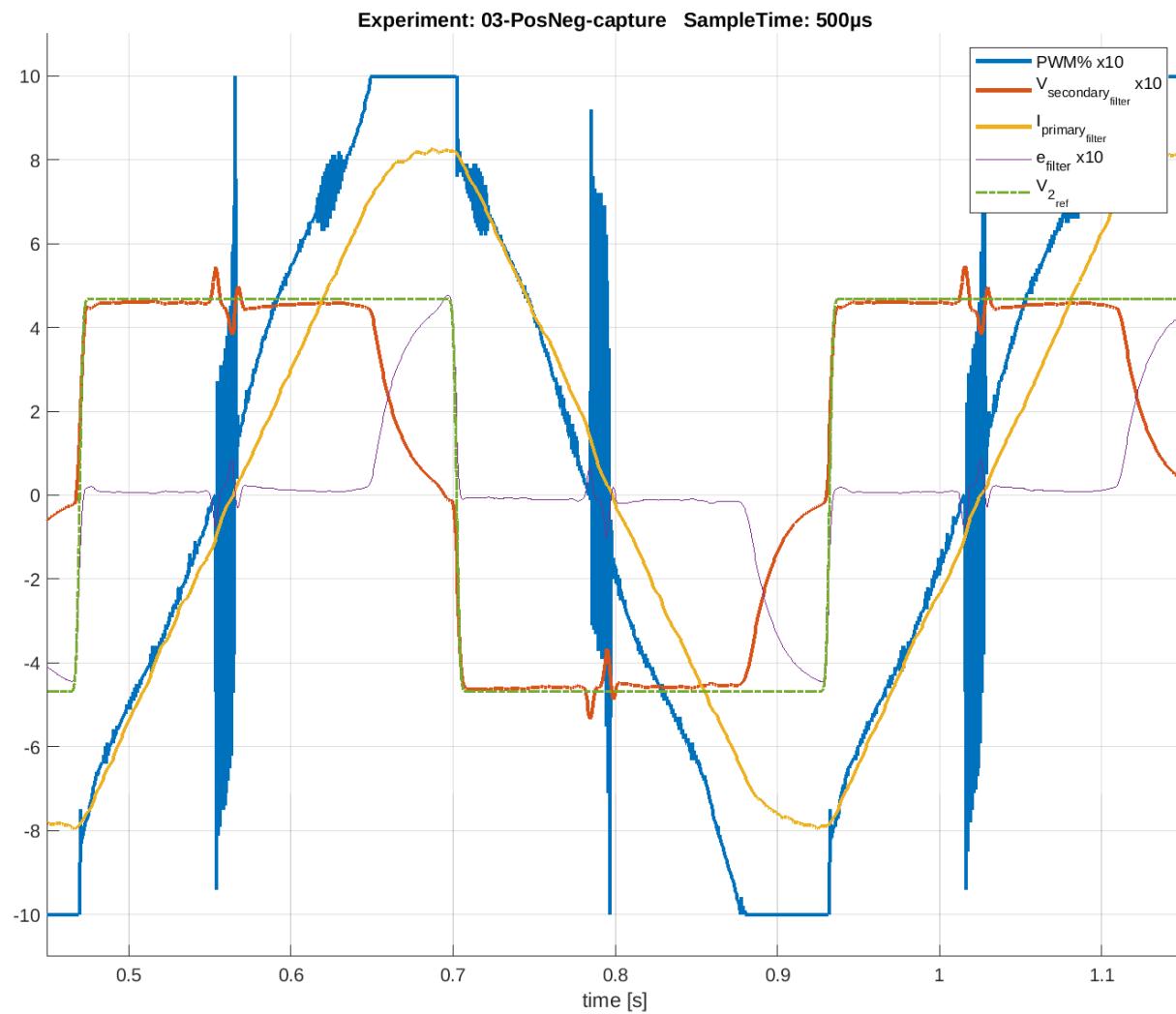
$$\begin{cases} x^+ = x_k + K_1 T_s \cdot u_k \\ y_k = x_k \end{cases}$$

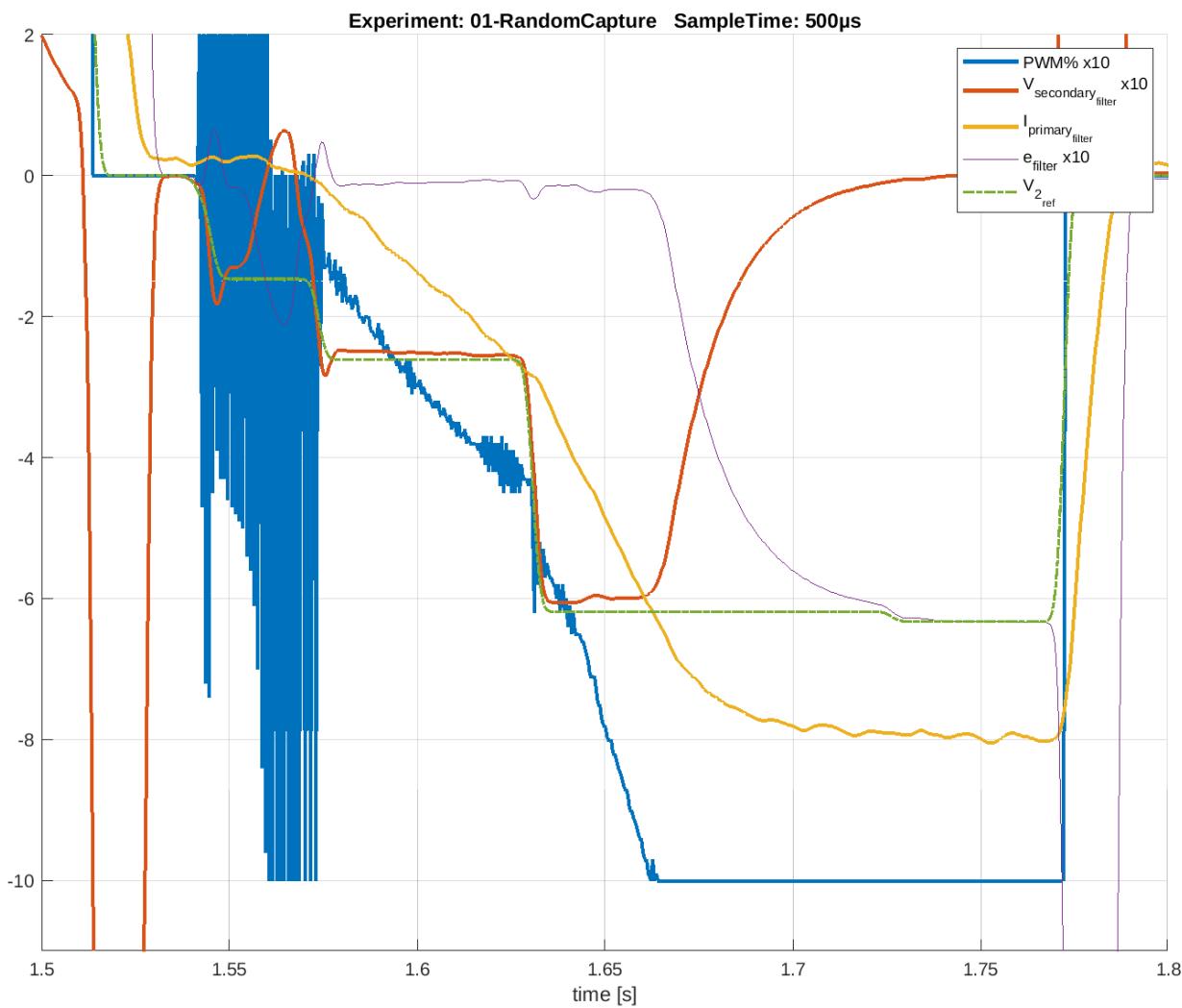
$$C_I(z)|_{T_s} = \frac{K_1 T_s}{z-1}$$

$$\{y_k = K_p \cdot u_k\}$$

$$C_p(z)|_{T_s} = K_p$$









EMP: Embedded Message Pack

<https://github.com/Alfystar/EMP>

Key feature, scopi e limiti di EMP



- EMP nasce con l'obiettivo di standardizzare un protocollo di comunicazione per lo scambio di pacchetti multipli.

Key feature, scopi e limiti di EMP



- EMP nasce con l'obiettivo di standardizzare un protocollo di comunicazione per lo scambio di pacchetti multipli.
- È progettata per automatizzare il lavoro di programmazione necessario all'invio e alla ricezione di pacchetti tra 2 Device connessi **Peer2Peer** (nessuna pretesa di networking) tra device poco potenti.

Key feature, scopi e limiti di EMP



- EMP nasce con l'obiettivo di standardizzare un protocollo di comunicazione per lo scambio di pacchetti multipli.
- È progettata per automatizzare il lavoro di programmazione necessario all'invio e alla ricezione di pacchetti tra 2 Device connessi **Peer2Peer** (nessuna pretesa di networking) tra device poco potenti.
- Al suo interno comprende un **layer software per l'integrità del pacchetto** attraverso un CRC8.

Key feature, scopi e limiti di EMP



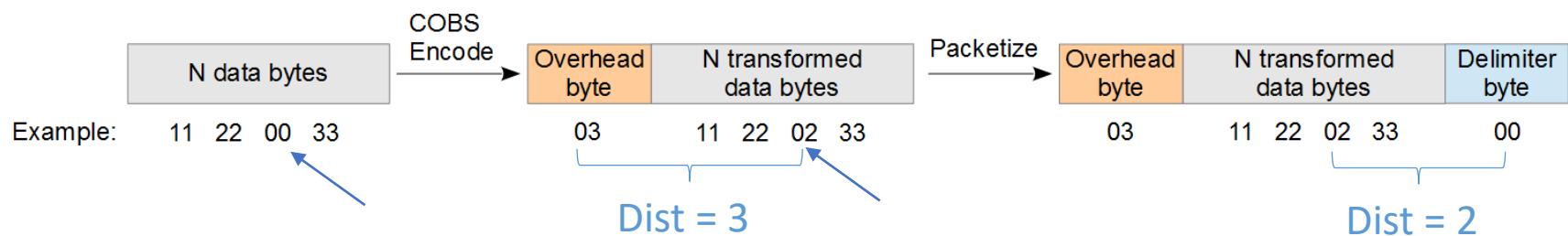
- EMP nasce con l'obiettivo di standardizzare un protocollo di comunicazione per lo scambio di pacchetti multipli.
- È progettata per automatizzare il lavoro di programmazione necessario all'invio e alla ricezione di pacchetti tra 2 Device connessi **Peer2Peer** (nessuna pretesa di networking) tra device poco potenti.
- Al suo interno comprende un **layer software per l'integrità del pacchetto** attraverso un CRC8.
- La libreria è stata realizzata poiché un sistema simile non è attualmente presente per dispositivi embedded dalle prestazioni modeste.

Protocollo di comunicazione

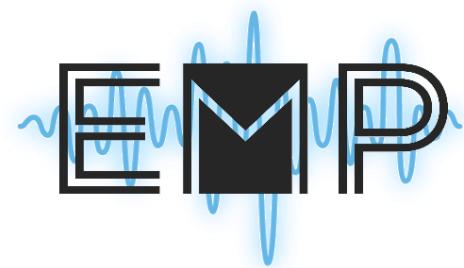
Consistent Overhead Byte Stuffing (COBS)

È un algoritmo per codificare byte di informazione dividendoli in frame attraverso un algoritmo **non ambiguo**.

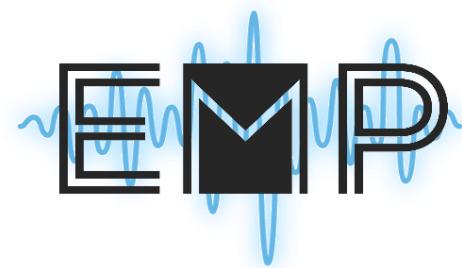
COBS trasforma una stringa arbitraria di byte, ciascuno dei quali ha un Range di valori da [0:255] in una stringa di byte dove però ogni byte va da [1:255].



Conseguenze del protocollo



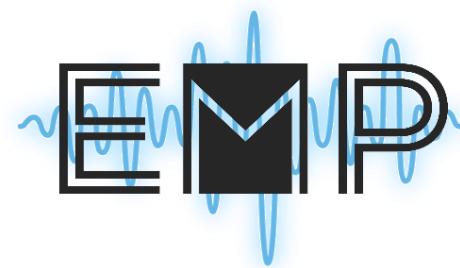
Vantaggi



Conseguenze del protocollo

Vantaggi

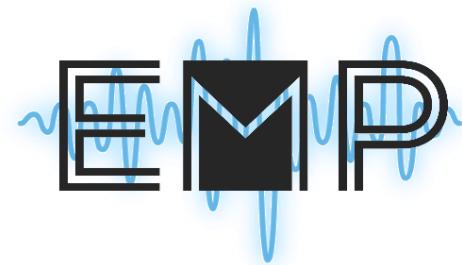
1. Pacchetti **self-delimited**



Conseguenze del protocollo

Vantaggi

1. Pacchetti **self-delimited**
2. Canale **multi-packet ready**

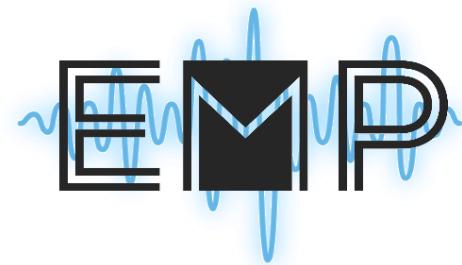


Conseguenze del protocollo

Vantaggi

1. Pacchetti **self-delimited**
2. Canale **multi-packet ready**
3. Protocollo **senza negoziazioni**

Conseguenze del protocollo



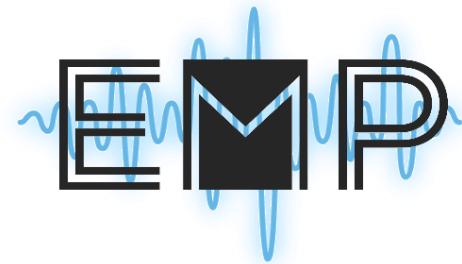
Vantaggi

1. Pacchetti **self-delimited**
2. Canale **multi-packet ready**
3. Protocollo **senza negoziazioni**

Svantaggi

1. Aggiunge 2 byte fissi

Conseguenze del protocollo

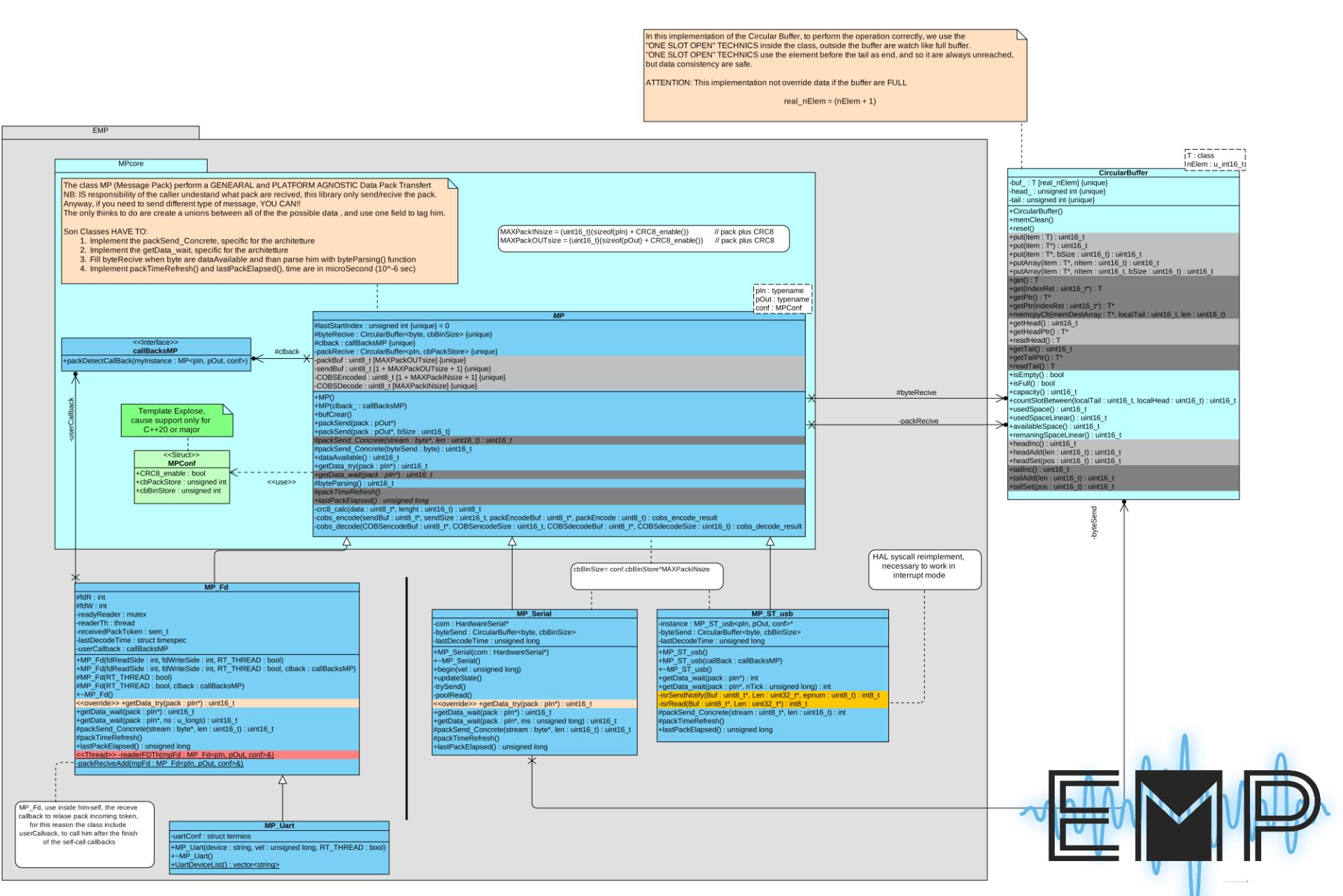


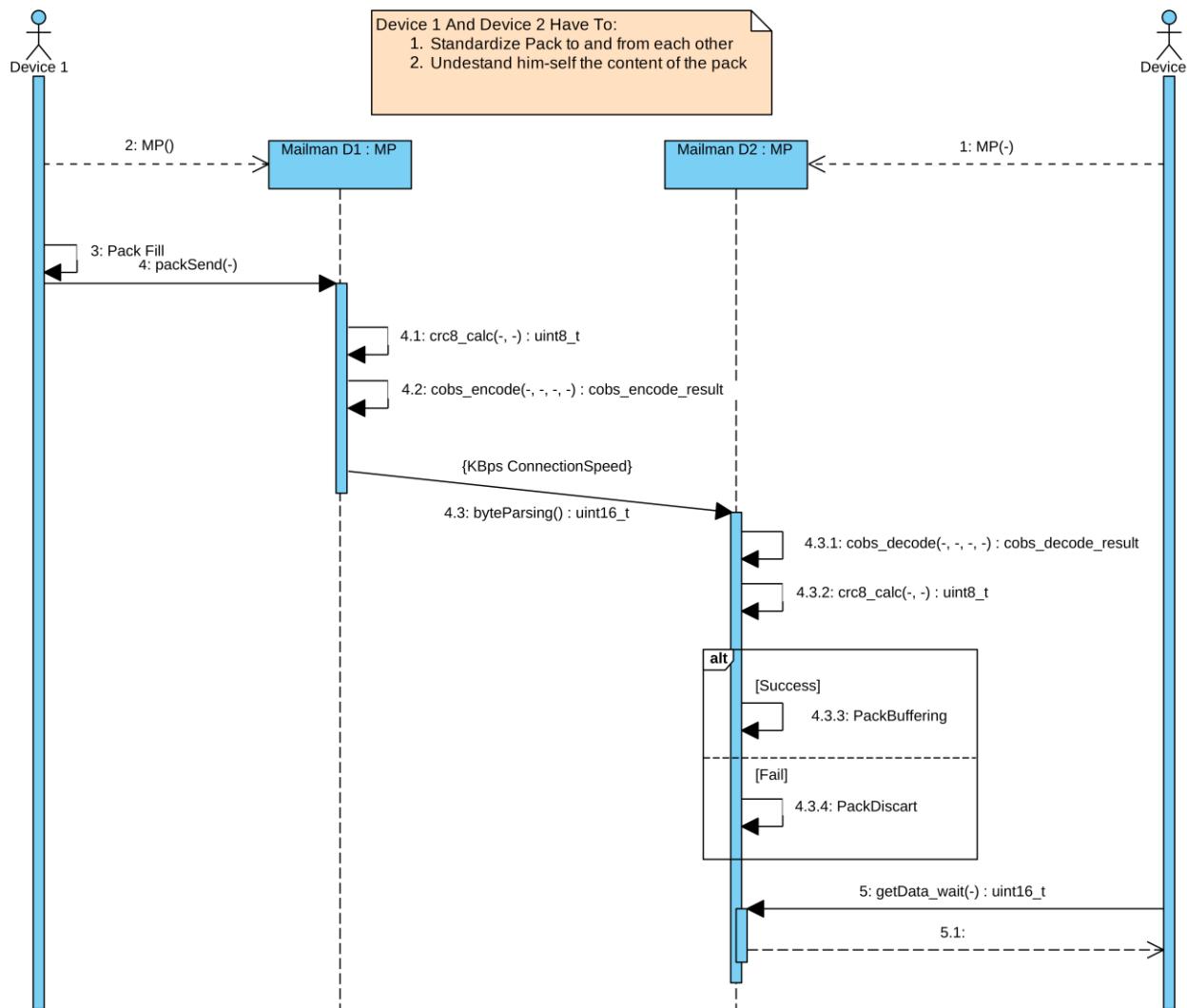
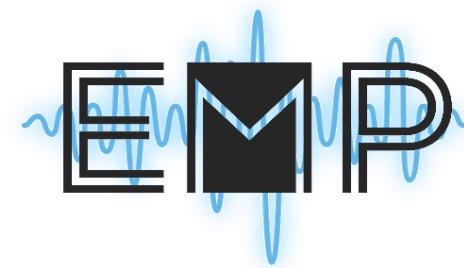
Vantaggi

1. Pacchetti **self-delimited**
2. Canale **multi-packet ready**
3. Protocollo **senza negoziazioni**

Svantaggi

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





Conclusioni e sviluppi futuri

Il progetto sviluppato sin ora:

Conclusioni e sviluppi futuri

Il progetto sviluppato sin ora:

- Replica controllo e diagnostiche di base in un Tokamak

Conclusioni e sviluppi futuri

Il progetto sviluppato sin ora:

- Replica controllo e diagnostiche di base in un Tokamak
- Permette un controllo seriale attraverso un device esterno (EMP)

Conclusioni e sviluppi futuri

Il progetto sviluppato sin ora:

- Replica controllo e diagnostiche di base in un Tokamak
- Permette un controllo seriale attraverso un device esterno (EMP)
- Ammette di osservare in «streaming» l'evoluzione dell'esperimento

Conclusioni e sviluppi futuri

Il progetto sviluppato sin ora:

- Replica controllo e diagnostiche di base in un Tokamak
- Permette un controllo seriale attraverso un device esterno (EMP)
- Ammette di osservare in «streaming» l'evoluzione dell'esperimento

Possibili sviluppi possono essere:

Conclusioni e sviluppi futuri

Il progetto sviluppato sin ora:

- Replica controllo e diagnostiche di base in un Tokamak
- Permette un controllo seriale attraverso un device esterno (EMP)
- Ammette di osservare in «streaming» l'evoluzione dell'esperimento

Possibili sviluppi possono essere:

- Upgrade del µC per alzare le frequenze di campionamento

Conclusioni e sviluppi futuri

Il progetto sviluppato sin ora:

- Replica controllo e diagnostiche di base in un Tokamak
- Permette un controllo seriale attraverso un device esterno (EMP)
- Ammette di osservare in «streaming» l'evoluzione dell'esperimento

Possibili sviluppi possono essere:

- Upgrade del µC per alzare le frequenze di campionamento
- Studiare e implementare un controllore switching

Conclusioni e sviluppi futuri

Il progetto sviluppato sin ora:

- Replica controllo e diagnostiche di base in un Tokamak
- Permette un controllo seriale attraverso un device esterno (EMP)
- Ammette di osservare in «streaming» l'evoluzione dell'esperimento

Possibili sviluppi possono essere:

- Upgrade del µC per alzare le frequenze di campionamento
- Studiare e implementare un controllore switching
- Modificare l'attuatore di corrente con un dispositivo superiore

Conclusioni e sviluppi futuri

Il progetto sviluppato sin ora:

- Replica controllo e diagnostiche di base in un Tokamak
- Permette un controllo seriale attraverso un device esterno (EMP)
- Ammette di osservare in «streaming» l'evoluzione dell'esperimento

Possibili sviluppi possono essere:

- Upgrade del µC per alzare le frequenze di campionamento
- Studiare e implementare un controllore switching
- Modificare l'attuatore di corrente con un dispositivo superiore
- Integrare attraverso MARTe2 il prototipo al resto della rete