

**SPARC-ME-06/001**  
**12 December 2005**

## **STUDIO DI SISTEMI PER IL CONTROLLO DELLA TEMPERATURA AL DECIMO DI GRADO**

L. Pellegrino, U. Rotundo, (INFN/LNF)

### **1 INTRODUZIONE**

Il nuovo progetto SPARC, in corso di installazione, richiede per il suo funzionamento la stabilità termica del fluido di raffreddamento (acqua demineralizzata) di alcuni suoi componenti RF entro  $\pm 0.1$  °C.

L'ottenimento di una tale stabilità della temperatura del fluido all'ingresso dei componenti richiede un impegno notevole nel progetto idraulico, nella scelta e nell'integrazione dell'hardware di regolazione ed attuazione, negli accorgimenti di montaggio e nel commissioning finale. Per rendere l'idea della difficoltà di realizzazione di un tale sistema con componenti commerciali e soprattutto in condizioni "da campo", basti ricordare che i centri di taratura SIT in Italia sono in grado di effettuare tarature di strumenti di misura di temperatura solo entro  $\pm 0.05$  °C.

La scelta delle caratteristiche salienti dei componenti (riscaldatore, unità a tiristori, regolatore, sonda e trasmettitore di temperatura), nonché il loro posizionamento relativo nel circuito, è stata effettuata con l'ausilio di simulazioni realizzate per mezzo di LabVIEW. In questo lavoro viene presentata la soluzione impiantistica e di controllo studiata ed i risultati delle simulazioni effettuate.

Si fa riferimento al caso del raffreddamento del deflettore a radiofrequenza, perchè è l'unico componente completamente caratterizzato dal punto di vista termomeccanico.

Questo richiede una stabilità dimensionale sul raggio della superficie cilindrica interna migliore di 1 micron, corrispondente appunto a una variazione di temperatura di meno di 0.2 °C [1].

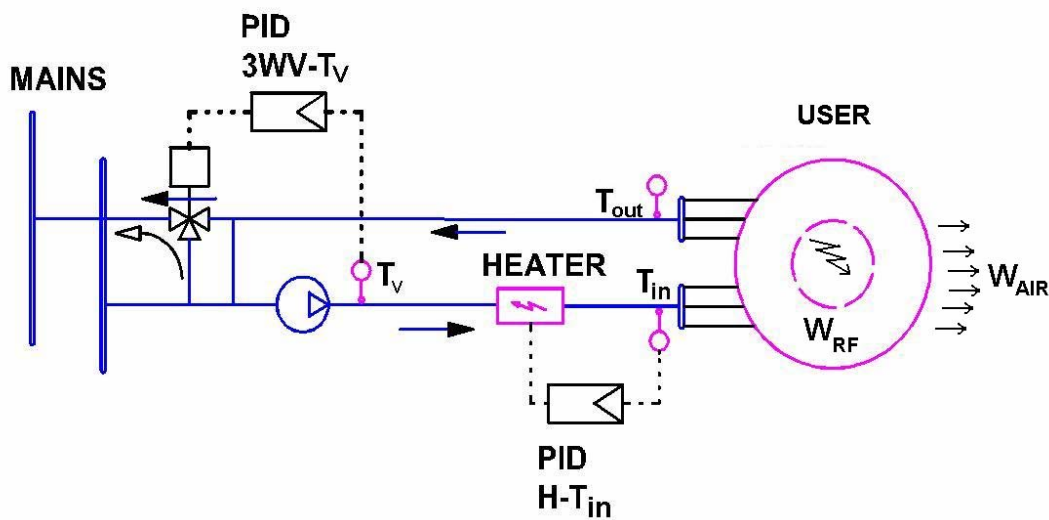
## 2 SCHEMA DELL'IMPIANTO IDRAULICO

Il problema della regolazione è stato scomposto in due parti:

1. primo stadio di regolazione con temperatura variabile entro  $\pm 0.5$  °C;
2. regolazione fine con temperatura variabile entro  $\pm 0.1$  °C.

La scelta di un sistema di controllo in due parti ed in particolare di un sistema locale a riscaldamento elettrico è dovuta principalmente all'impraticabilità di avere unità di pompaggio a ridosso dei componenti dell'acceleratore e dall'impossibilità di controllare la variazione parassita di temperatura lungo la linea idraulica dalla centrale all'utenza.

Per realizzare le due fasi successive del controllo anche l'impianto è stato suddiviso in due parti, come rappresentato in Figura 1.



**Figura 1:** schema dell'impianto idraulico.

La regolazione di primo stadio, posizionata in centrale, è ottenuta per mezzo di un sistema con valvola a tre vie in configurazione a iniezione sul ritorno, con prevalenza disponibile tra le linee principali, controllato da un regolatore la cui variabile di processo è la temperatura  $T_v$  sulla mandata dell'impianto. Tale configurazione opera a portata costante sia nel circuito regolato che verso il resto dell'impianto; l'autorità della valvola deve essere sufficientemente alta, vicino a 0.5.

Lo stadio finale è affidato ad un altro controllore che regola la temperatura del fluido negli immediati pressi dell'utenza ed agisce su un'unità a tiristori per modulare la potenza di un riscaldatore elettrico locale.

La distribuzione di temperatura del corpo del componente raffreddato è direttamente legata a  $T_{in}$ , dalla quale differisce per effetto dello scambio convettivo con l'ambiente ( $W_{AIR}$ ) e per il carico termico della radio frequenza ( $W_{RF}$ ).

La prima parte della regolazione si considera ottenibile senza particolari difficoltà con ottimi componenti commerciali. Inoltre risulta in comune con altri componenti dell'acceleratore.

Nel seguito si analizza quindi la seconda parte.

### 3 SISTEMA DI REGOLAZIONE FINE: SCHEMA DI SIMULAZIONE E RISULTATI

Consideriamo il sistema a partire dalla sonda di temperatura  $T_v$  fino all'uscita del componente raffreddato, cioè fino alla sonda di temperatura  $T_{out}$  (Figura 1).

Possiamo considerare il circuito come se fosse a “passaggio singolo”, tenendo conto della variabilità di  $T_v$  entro  $\pm 0.5$  °C, controllo garantito dal sistema con valvola a tre vie precedentemente descritto. Le relazioni che descrivono le temperature nei vari punti del circuito sono riportate di seguito.

$$T_{in} = T_v + \frac{W_H}{c \cdot \rho \cdot q} \quad (1)$$

$$T_B = T_{in} + (T_{B_0} - T_{in} - \frac{W}{hA})e^{-\frac{hAt}{\rho V c}} + \frac{W}{hA} \quad (2)$$

$$T_{out} = T_{in} + \frac{(W_{RF} - W_{AIR})}{c \cdot \rho \cdot q} \quad (3)$$

$$W_{AIR} = (T_B - T_{AIR}) \cdot h_{AIR} A_{AIR} \quad (4)$$

Nelle relazioni precedenti i simboli hanno il seguente significato:

**W<sub>H</sub>**: potenza del riscaldatore [W]

**q**: portata di fluido [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ]

**T<sub>B</sub>**: temperatura del corpo del deflettore RF [°C]

**T<sub>B0</sub>**: temperatura iniziale del corpo del deflettore RF [°C]

**h**: coefficiente di convezione [ $W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$ ]

**A**: superficie di scambio convettivo [ $m^2$ ]

**$\rho$** : densità del fluido [ $kg \cdot m^{-3}$ ] (acqua demineralizzata)

**V**: volume del fluido [ $m^3$ ]

**c**: capacità termica [ $J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$ ]

**W**: potenza termica scambiata [W]

**W<sub>RF</sub>**: potenza termica ricevuta per effetto degli impulsi della cavità a RF [W]

**W<sub>AIR</sub>**: potenza termica scambiata con l'ambiente circostante [W].

Con le relazioni precedenti è stato sviluppato un applicativo (VI) in LabVIEW che simula il funzionamento dell'impianto. Le ipotesi utilizzate per lo sviluppo e le impostazioni della simulazione prevedono:

1. fluido di processo: acqua demineralizzata
2. velocità del fluido di  $1 m \cdot s^{-1}$
3. variabilità tipica di  $T_v$  di tipo cosinusoidale ( $44.5$  °C  $\pm$   $0.5$  °C) con periodo di 60 s
4. potenza del riscaldatore di 1300 W (sufficiente per  $(T_v - T_B \text{ set})_{max}$ )
5. andamento di temperatura lineare all'interno del riscaldatore
6. tempo di attraversamento tipico del riscaldatore di 10 s
7. accuratezza di lettura sulla misura di temperatura  $T_{in}$  di  $\pm 0.03$  °C
8. ritardo di trasmissione tra la misura di temperatura ed il regolatore PID di 0.5 s

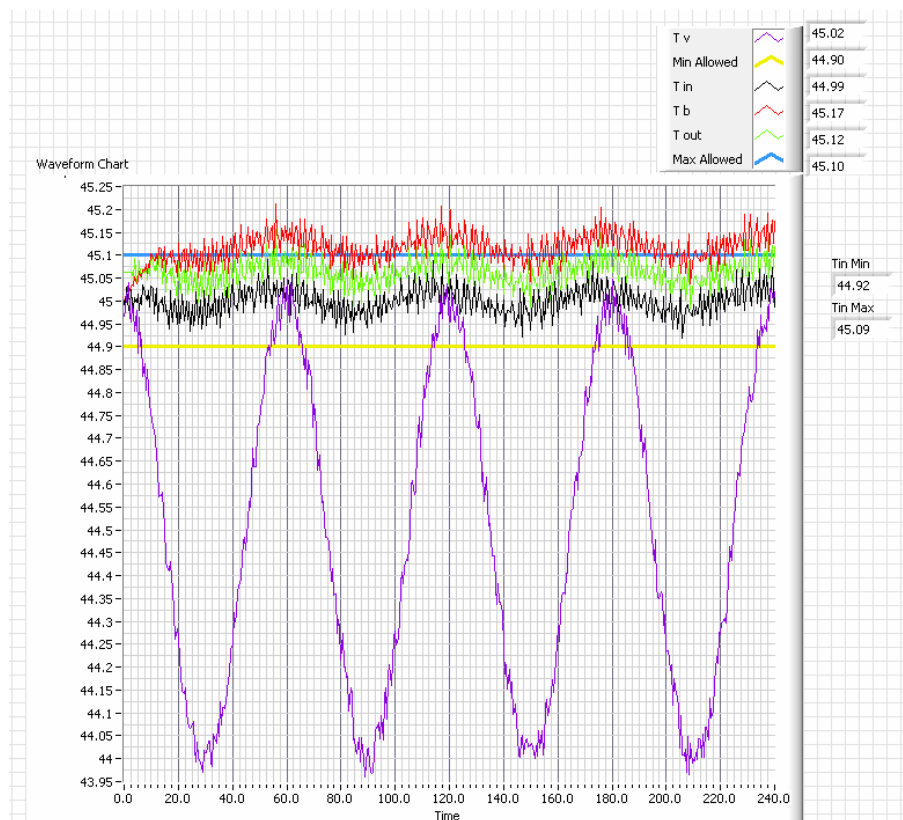
9. accuratezza di attuazione dell'unità a tiristori dell' 1%
10. tempo ciclo del PID 0.5 s
11.  $W_{RF}$  di 90 W [1]
12.  $W_{AIR}$  di 13.9 W [1]
13.  $q$  di  $0.285 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$  [1]
14.  $T_{B0}$  di  $45 \text{ }^\circ\text{C}$
15. ritardo della lettura di  $T_{out}$  rispetto a  $T_{in}$  di 3 secondi (distanza tra le sonde di 3 m).

La variabilità di  $T_v$  di tipo cosinusoidale è stata assunta come ingresso canonico, mentre la potenza del riscaldatore è dimensionata sulla massima differenza di temperatura prevista ( $1 \text{ }^\circ\text{C}$ ) con un tempo di attraversamento dell'elemento riscaldante di 10 secondi. L'andamento di temperatura all'interno del riscaldatore è stato supposto lineare. L'accuratezza del tiristore e della catena di misura di temperatura è la migliore raggiungibile per lo stato dell'arte di componenti speciali ma commerciali. Le incertezze sugli attuatori e sulle misure sono stati modellati con l'introduzione di un rumore variabile in maniera casuale che si sovrappone ai risultati dei calcoli effettuati dal VI in base alle formule precedentemente riportate (1,2,3,4).

Con le condizioni indicate per le simulazioni il controllo di temperatura è ottimizzato (minima oscillazione corrispondente alla perturbazione sinusoidale) con un regolatore di tipo PI con i seguenti valori dei parametri:

- $K_c$  (guadagno proporzionale) di 28
- $T_i$  (tempo integrale, espresso in minuti) di 0.0025;

con tali valori si ottiene una temperatura  $T_{in}$  variabile entro  $\pm 0.09 \text{ }^\circ\text{C}$ . Nella seguente Figura 2 è riportato il risultato finale dell'ottimizzazione dei parametri, come grafico del VI.



**Figura 2:** risultato finale della simulazione di funzionamento dell'impianto.

In Figura le due linee orizzontali (blu e gialla) rappresentano il campo di variabilità ammissibile per la temperatura sotto controllo. Si vede come  $T_{in}$ , rappresentata dalla linea nera, rimanga all'interno della tolleranza del decimo di grado.

#### 4 OTTIMIZZAZIONE DEI PARAMETRI

Il raggiungimento del controllo visto sopra è stato ottenuto per affinzioni successive. In particolare sono stati testati gli effetti di variazione di vari parametri (ritardo sulla variabile controllata, tempo di attraversamento del riscaldatore, accuratezza del tiristore e accuratezza della lettura di temperatura) sul funzionamento dell'impianto. Di seguito vengono descritti gli effetti delle variazioni di ciascuna caratteristica considerata singolarmente, cioè mantenendo le altre inalterate.

Nella seguente Tabella sono riportati gli aspetti distintivi delle varie figure, nelle varie prove di simulazione.

	Ritardo tra $T_{in}$ e $T_{out}$ [sec]	Accuratezza della misura di $T$ [ $^{\circ}C$ ]	Accuratezza dell'unità a $T_{yr}$	$K_c$	$T_i$ [min]
Figura 2	3	$\pm 0.03$	1%	28	0.0025
Figura 3	3	$\infty$	0.1%	30	0.0300
Figura 4	2	$\infty$	0.1%	34	0.0290
Figura 5	1	$\infty$	0.1%	34	0.0290
Figura 6	3	$\pm 0.1$	0.1%	20	0.0075
Figura 7	3	$\pm 0.05$	0.1%	20	0.0075
Figura 8	3	$\pm 0.03$	10%	20	0.0045

**Tabella 1 : riepilogo dei risultati esposti nelle figg. 2-8**

##### 4.1 Posizione della sonda di temperatura e velocità di attraversamento del riscaldatore

Originariamente si era pensato di effettuare il controllo sulla temperatura  $T_{out}$ , considerando trascurabili gli errori di lettura di temperatura ed una precisione dello 0.1% di attuazione del tiristore.

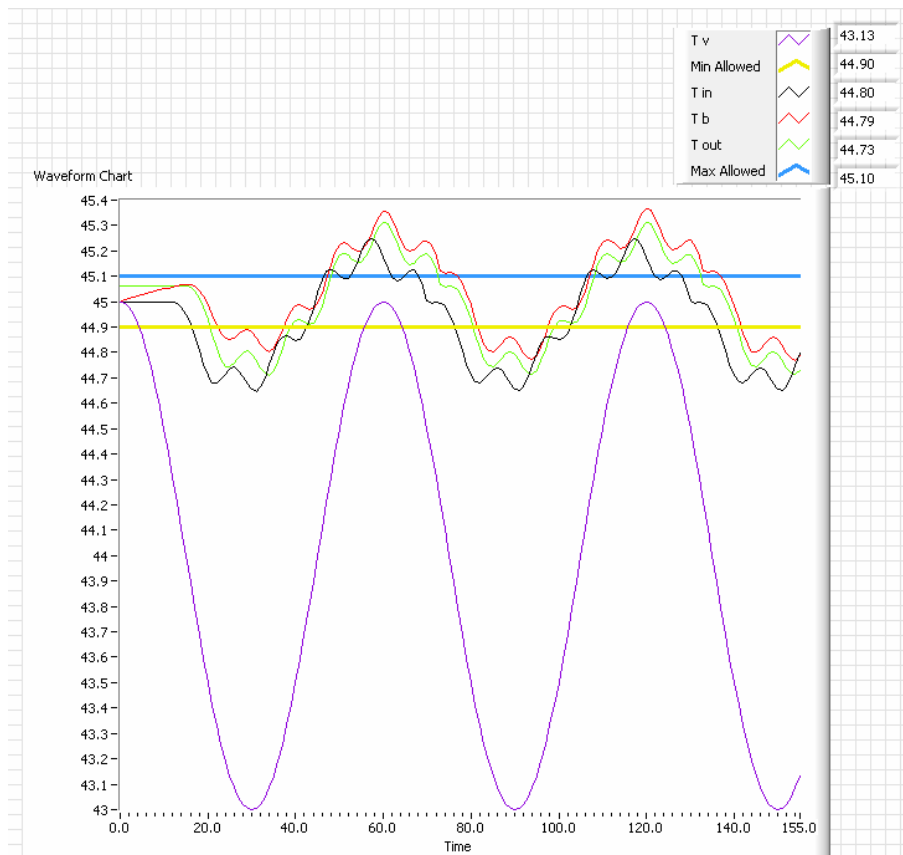
La scelta di monitorare la temperatura all'uscita del deflettore era determinata dall'intenzione di controllare eventuali effetti transitori non previsti per effetto degli scambi termici con l'ambiente circostante e con gli impulsi RF.

Tuttavia, con questa configurazione non si riesce ad ottenere un controllo migliore di  $\pm 0.5$   $^{\circ}C$ . Pertanto sono stati fatti dei tentativi modificando, separatamente, il tempo di attraversamento del riscaldatore ed il ritardo tra le letture di  $T_{in}$  e  $T_{out}$ .

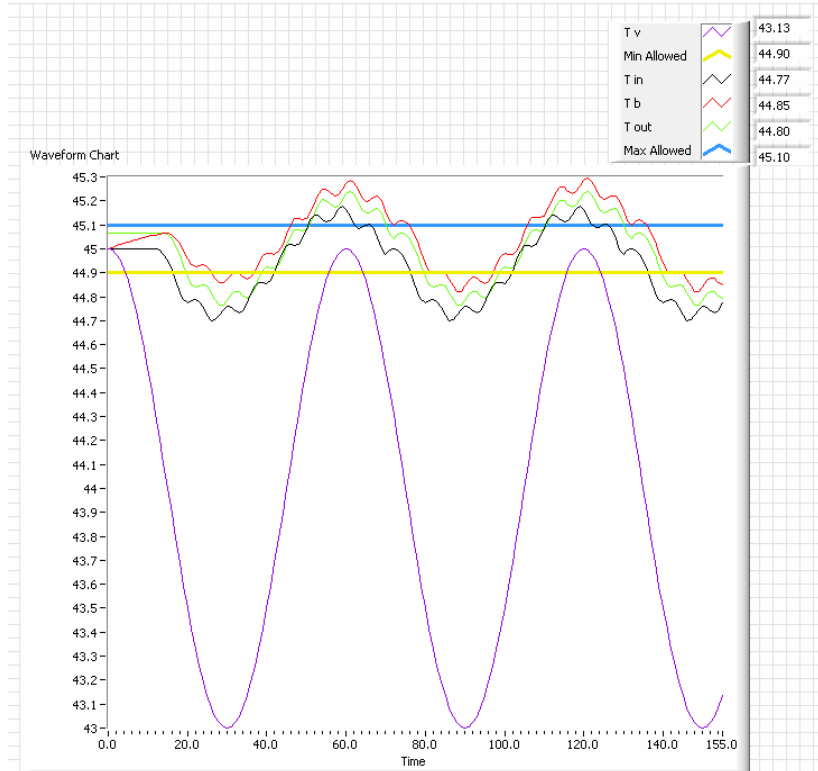
Si osserva che modificando il tempo di attraversamento del riscaldatore l'effetto sull'oscillazione di temperatura è praticamente nullo. Si nota invece una variazione dello sfasamento tra la temperatura  $T_v$  ed il gruppo delle restanti temperature. Questo deriva dal fatto che il controllo di tipo integrale ( $T_i$ ) comporta la presenza di un polo nell'origine nella

funzione di trasferimento del sistema; tale polo introduce uno sfasamento nel senso dell'anticipo di fase di  $90^\circ$ , ovvero un quarto di periodo. Essendo stata assunta una variabilità di  $T_v$  con periodo di 60 s, un quarto di periodo corrisponde ad un anticipo di 15 s. Pertanto considerando un tempo di attraversamento del riscaldatore minore di 15 s si otterranno andamenti delle temperature  $T_{in}$ ,  $T_B$  e  $T_{out}$  in anticipo rispetto a  $T_v$ , altrimenti tali andamenti saranno in ritardo rispetto a  $T_v$ . Ad esempio per un tempo di attraversamento del riscaldatore di 20 s lo sfasamento tra le temperature sarebbe di 5 s, con  $T_v$  in anticipo sulle altre tre.

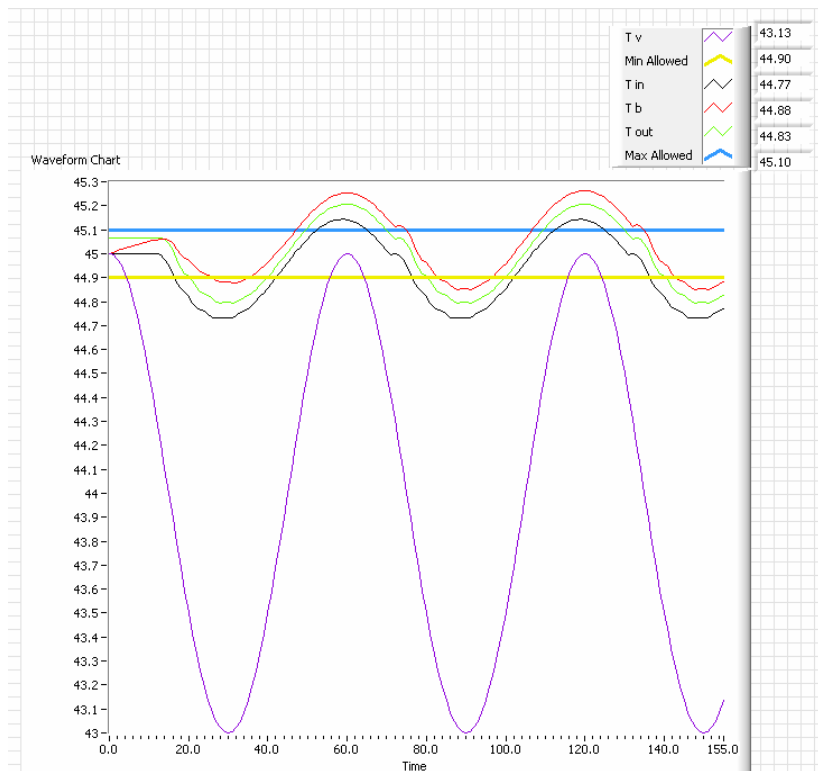
Modificando invece il ritardo tra  $T_{in}$  e  $T_{out}$ , si osserva un miglioramento dell'oscillazione di temperatura. Sono stati effettuati test con valori del ritardo di tre, due ed un secondo, mantenendo costante il tempo di attraversamento del riscaldatore. I risultati delle simulazioni mostrano un miglioramento del controllo di temperatura, rispettivamente negli intervalli  $\pm 0.3^\circ\text{C}$  (delay di 3 s),  $\pm 0.24^\circ\text{C}$  (delay di 2 s),  $\pm 0.205^\circ\text{C}$  (delay di 1 s), che tuttavia non soddisfano il livello di precisione richiesto. I risultati delle simulazioni sono riportati di seguito nelle Figure 3, 4 e 5. A questo punto si è deciso di operare il controllo direttamente su  $T_{in}$ , come indicato in Figura 1 e di mantenere il ritardo tra le sonde a tre secondi, per facilitarne l'istallazione. In queste condizioni (e, si ricorda, mantenendo nulli gli errori di misura e allo 0.1% quelli di attuazione) il controllo al decimo di grado sarebbe ampiamente rispettato ( $\pm 0.06^\circ\text{C}$ ).



**Figura 3:** simulazione di funzionamento con ritardo fra  $T_{in}$  e  $T_{out}$  di 3 secondi.



**Figura 4:** simulazione di funzionamento con ritardo fra  $T_{in}$  e  $T_{out}$  di 2 secondi.



**Figura 5:** simulazione di funzionamento con ritardo fra  $T_{in}$  e  $T_{out}$  di 1 secondo.

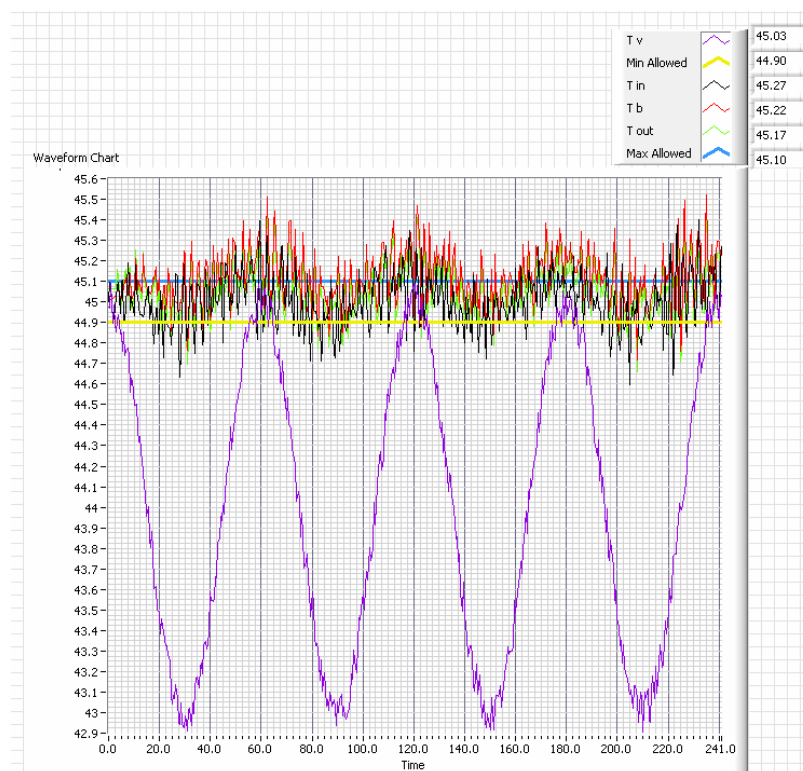
#### 4.2 Accuratezza della sonda di temperatura

Il passo successivo nella modellazione del sistema reale è stata l'introduzione nel VI

dell'accuratezza del sistema di lettura di temperatura per la variabile di processo che sarà controllata dal regolatore PID. Sono state effettuate delle simulazioni con incertezze di misura di  $\pm 0.1$  °C e  $\pm 0.05$  °C. In entrambi i casi non si riesce a trovare una combinazione dei parametri del PID che porti ad una regolazione migliore di  $\pm 0.175$  °C. I risultati delle simulazioni sono riportati di seguito nelle Figure 7 e 8. Rispetto alle precedenti simulazioni è stato aumentato il tempo di prova per aumentarne la validità statistica, perchè l'incertezza di misura viene introdotta come un errore casuale. Si è visto che per ottenere il controllo voluto è necessaria un'accuratezza della catena di misura di almeno  $\pm 0.03$  °C. Tale richiesta non può essere soddisfatta in Italia, in quanto il centro SIT (Servizio Italiano di Taratura) più accurato è in grado di certificare catene di misura con una precisione di al più  $\pm 0.05$  °C.

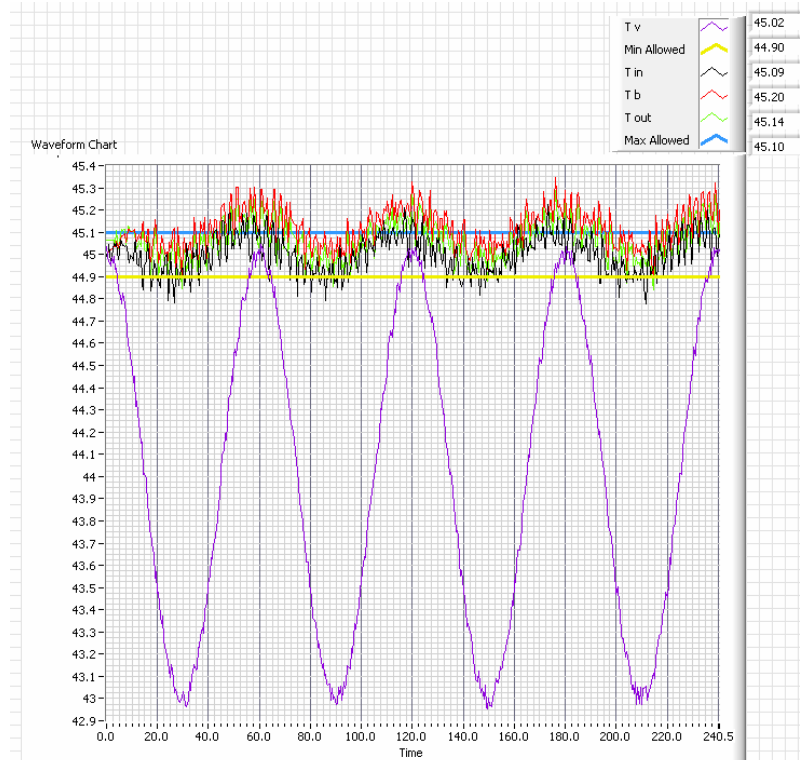
Tuttavia esistono centri di taratura esteri (americano, danese, tedesco, inglese) in grado di fornire certificati per le accuratezze richieste.

L'accuratezza implementata nel VI è intesa come “overall accuracy”, cioè tiene conto dell'accuratezza della conversione A\D tra sensore e trasmettitore, di ripetibilità, isteresi, linearità e stabilità, della compensazione degli effetti di drift di lungo termine e variazione delle condizioni ambientali, nonché della compensazione di effetti EMI\RFI e derivanti da variazioni nella tensione di alimentazione.



**Figura 6:** simulazione di funzionamento con accuratezza di misura di  $\pm 0.1$  °C.



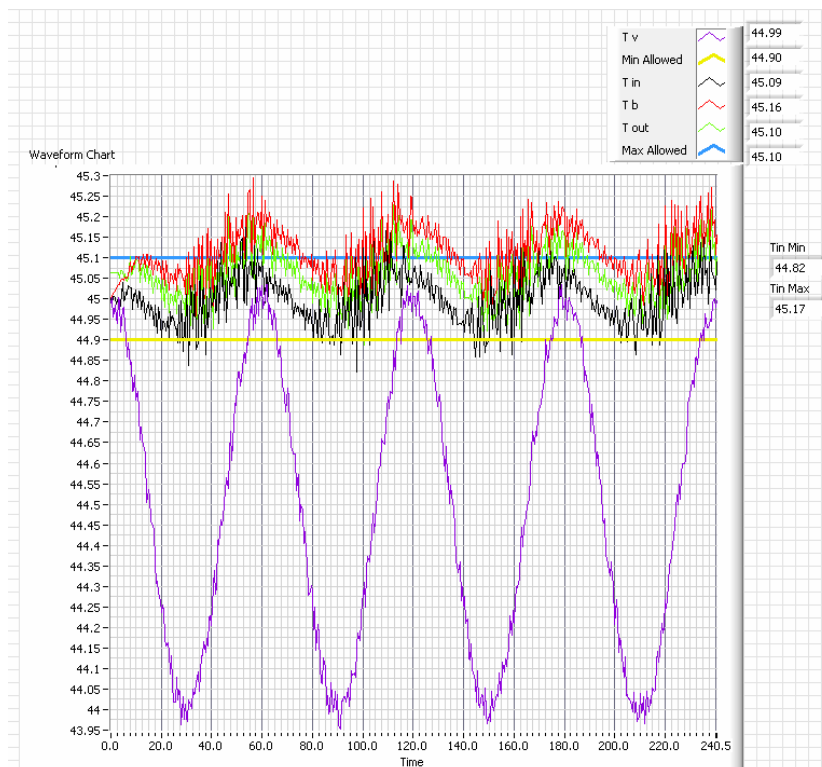


**Figura 7:** simulazione di funzionamento con accuratezza di misura di  $\pm 0.05$  °C.

Per la trasmissione dati dal campo al regolatore e al PLC è necessaria una comunicazione digitale, di tipo seriale o ethernet o bus di campo. Questo per evitare di introdurre ulteriori errori per la conversione D/A all'interno del trasmettitore e nuovamente A/D al regolatore. Anche questi aspetti rientrano nella “overall accuracy” precedentemente introdotta.

### 4.3 Accuratezza di comando del tiristore

Da ultimo consideriamo l'accuratezza del tiristore, per la gestione elettrica del riscaldatore. Inizialmente è stato adottato un valore di accuratezza di  $\pm 0.1$  % della potenza impiegata. Successivamente, in seguito ad un'indagine di mercato delle caratteristiche di questo tipo di attuatore, sono state effettuate delle simulazioni con valori di accuratezza per il tiristore di  $\pm 1$  % e  $\pm 10$  %, riscontrando che con tale ultimo valore il controllo di temperatura al decimo di grado non è realizzabile. I risultati delle simulazioni sono riportati in Figura 8 per l'accuratezza del 10% ed in Figura 2 (risultato finale) per l'accuratezza dell'1%. La precisione dei tiristori all'un per cento è quanto di più accurato si riesca a trovare in commercio; con tale valore si riesce ad ottenere il controllo di temperatura al decimo e pertanto è stato assunto come caratteristico dei tiristori da impiegare per l'attuazione dei riscaldatori di SPARC.



**Figura 8:** simulazione di funzionamento con accuratezza del tiristore del 10%.

## 5 CONCLUSIONI E SVILUPPI

La simulazione descritta ha consentito di stabilire le specifiche tecniche minime dei componenti, necessarie per ottenere il controllo di temperatura voluto, nonché i valori da assegnare ai parametri del regolatore PID per arrivare a tale scopo.

Inoltre ha consentito di effettuare la scelta della posizione più opportuna della sonda di misura della variabile di processo per la regolazione al decimo di grado.

Un ulteriore sviluppo del simulatore dovrebbe prevedere l'introduzione dell'accuratezza di attuazione del regolatore PID. Tuttavia, stando alle attuali tecnologie produttive di questi componenti, tale aspetto dovrebbe risultare non critico ai fini delle richieste di funzionamento per SPARC qualora venisse impiegato un regolatore con almeno 18 bit.

A conclusione della fase di simulazione il passo successivo sarà quello di effettuare dei test sperimentali a scopo di validazione del lavoro svolto e per garantire il funzionamento richiesto.

## 6 REFERENCES

- [1] L. Pellegrino, "Study of the cooling for the SPARC RF deflector", MEDSI-PROC-04-55, (Grenoble, 2004).