



Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie,  
l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile

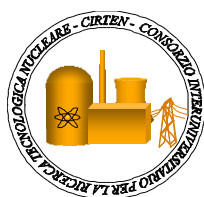


*Ministero dello Sviluppo Economico*

## RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Sviluppo e calibrazione di una sonda a termocoppia riscaldata per  
misure di velocità in liquidi: risultati dei lavori di revisione di una  
catena di misura anemometrica

*F. Romanello, M. Furrer, M. Presaghi, A. Scotini, M. Sica*



SVILUPPO E CALIBRAZIONE DI UNA SONDA A TERMOCOPPIA RISCALDATA PER MISURE DI VELOCITA' IN LIQUIDI: RISULTATI DEI LAVORI DI REVISIONE DI UNA CATENA DI MISURA ANEMOMETRICA

F. Romasnello, M. Furrer, M. Presaghi, A. Scotini, M. Sica

Settembre 2010

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Produzione e fonti energetiche

Tema: Nuovo Nucleare da Fissione

Responsabile Tema: Stefano Monti, ENEA

**Titolo**

**Sviluppo e calibrazione di una sonda a termocoppia riscaldata per misure di velocità in liquido: Risultati dei lavori di revisione di una catena di misura anemometrica**

**Autori: F. Romanello, M. Furrer, M. Presaghi, A. Scotini, M. Sica**

**Descrittori**

**Tipologia del documento:** Rapporto tecnico/Technical Report  
**Collocazione contrattuale:** Accordo di programma ENEA-MSE: tema di ricerca "Nuovo nucleare da fissione"  
**Argomenti trattati:** Reattori nucleari ad acqua, Strumentazione

**Sommario**

Questa relazione è stata emessa nell'ambito del secondo PAR dell'accordo di programma ENEA-MSE ed è uno dei deliverable dell'obiettivo C "Prova Integrale IRIS: selezione strumentazione Speciale" della linea progettuale LP2 "Reattori Evolutivi INTD - International Near Term Deployment" del tema di ricerca "Nuovo Nucleare da Fissione".

Il documento descrive la progettazione, la realizzazione ed il funzionamento di una catena di misura realizzata per scopi anemometrici. Per vari problemi di instabilità è stata declassata a sistema di misura in grado di discriminare la fase liquida da quella gassosa con velocità di risposta superiori a quelle dello stato dell'arte anteriore. Grazie alle ridotte dimensioni raggiunte nella realizzazione di alcune soluzioni della sonda è possibile estenderne le applicazioni e i campi di misura.

**Note**

Copia n.

In carico a:

2			NOME			
			FIRMA			
1			NOME			
			FIRMA			
0	EMISSIONE	28/09/2010	NOME	F. Romanello	G. Boccardi	S. Monti
			FIRMA			
REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDAZIONE	CONVALIDA	APPROVAZIONE	

 <b>Ricerca Sistema Elettrico</b>	<b>Sigla di identificazione</b> NNFISS – LP2 - 028	<b>Rev.</b> 0	<b>Distrib.</b> L	<b>Pag.</b> 2	<b>di</b> 19
--	---	------------------	----------------------	------------------	-----------------

## **Indice**

1. Premessa
2. Stato dell'arte
3. Descrizione della carena di misura progettata
4. Le sonde a termoresistenza a riscaldamento
5. Sonde a termoresistenza
6. 6. Prove sperimentali di laboratorio
7. Conclusioni


## 1. PREMESSA

Il lavoro oggetto del presente rapporto è il prosieguo di un'indagine iniziata con l'ideazione, la progettazione e lo sviluppo di una catena di misura a termocoppia riscaldata con una alimentazione realizzata a divisione di tempo in modo da utilizzare lo stesso hardware per riscaldare e per rilevare la temperatura della sonda. In altre parole la termocoppia, di opportune dimensioni e geometria, veniva usata alternativamente come riscaldatore e immediatamente dopo come sensore di temperatura. La bassissima capacità termica della punta sensibile doveva fornire, insieme alla gestione del processo di riscaldamento e misura, le doti di misure anemometriche e la velocità di risposta adeguata a questo scopo.

Le caratteristiche peculiari di questa catena di misura erano quelle, oltre della resistenza a condizioni ambientali severe quali 360 °C e 180 bar, quelle di una ottima risposta ai transitori in quanto le ridotte dimensioni, le particolari geometrie della sonda e le soluzioni elettroniche adottate gli conferivano risposte dell'ordine di 20 ms nella transizione aria-acqua e 40 ms nella transizione acqua-aria. Inoltre le ridottissime dimensioni fisiche, lo studio geometrico della punta sensibile e i relativi esigui ingombri assicuravano bassissime perturbazioni fluidodinamiche durante la misura.

La fotografia seguente riporta alcune sonde realizzate in questa fase di ricerca e sviluppo.



 <b>Ricerca Sistema Elettrico</b>	<b>Sigla di identificazione</b>	<b>Rev.</b>	<b>Distrib.</b>	<b>Pag.</b>	<b>di</b>
	NNFISS – LP2 - 028	0	L	4	19

## 2. STATO DELL'ARTE

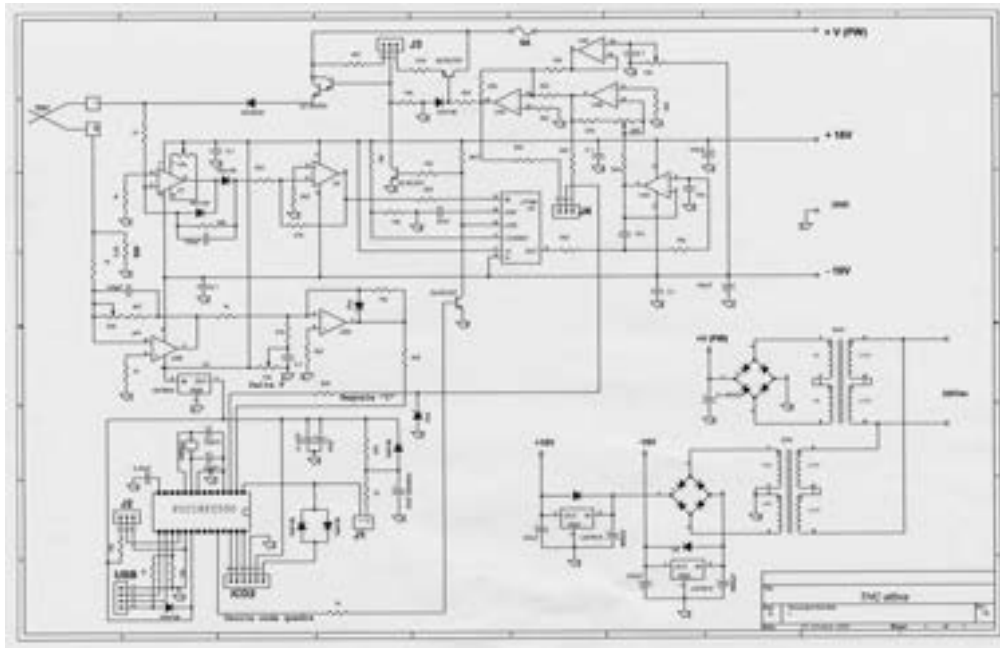
L'elettronica di gestione e controllo della precedente catena di misura utilizzava la filosofia circuitale a feedback; dalla f.e.m. prelevata dal sensore termoelettrico alla alimentazione della corrente di riscaldamento.

Per quanto concerne i risultati ottenuti nella prima fase di sviluppo il precedente rapporto analizza le motivazioni dell'insuccesso e propone una linea di sviluppo per cercare di risolvere e indagare su possibili strade da perseguire per giungere ad una catena di misura in grado di effettuare misure anemometriche in regimi a basse velocità.

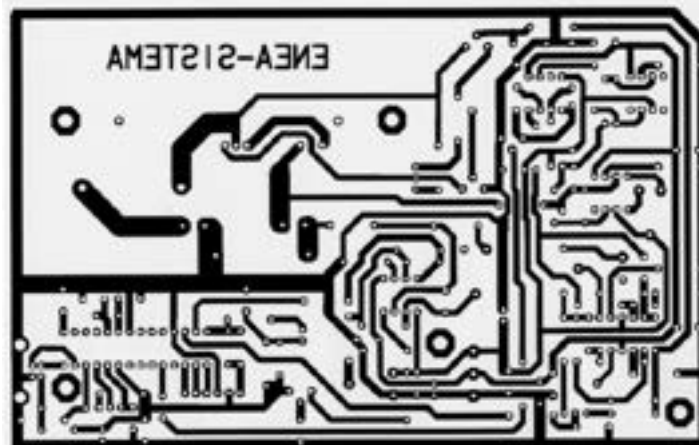
Sfruttando dunque le esperienze maturate nella prima fase si è proceduto su due strade parallele riprogettando ed ottimizzando sia la sonda che l'elettronica di gestione e controllo:

- si sono realizzati alcuni nuovi sensori a termoresistenza ottimizzati alla luce delle esperienze acquisite nella prima fase di studio cambiando materiali, dimensioni e geometrie;
- si è revisionato il circuito elettronico ed adattato al funzionamento con sensori a termoresistenza cambiando sostanzialmente alcuni componenti e variando le tarature in modo da adattare i diversi livelli dei segnali provenienti da sonde con caratteristiche elettriche diverse. Si sono anche tarate le correnti di riscaldamento adeguandole alle nuove caratteristiche dei nuovi sensori.

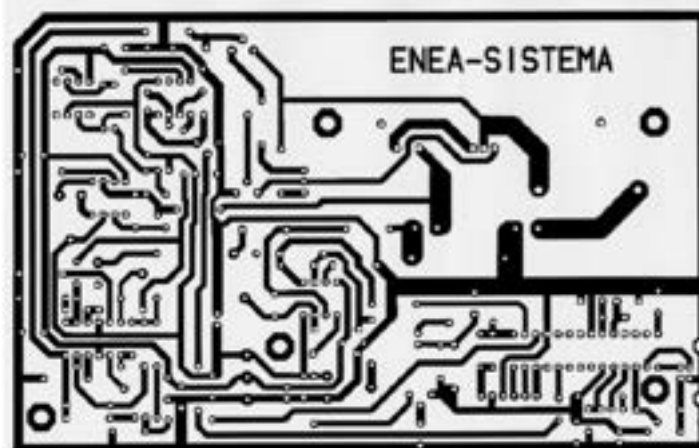
Di seguito si riportano gli schemi elettrici dei circuiti dai quali si nota che, rispetto alla versione precedente, ci sono state solo alcune variazioni di valori di componenti e tarature diverse degli stessi. Vengono riportati anche i circuiti stampati e i piani di montaggio sia dell'elettronica di controllo e trattamento che quella di alimentazione che risultano essere identici alla realizzazione precedente in quanto, come detto, non è cambiata la filosofia circuitale.



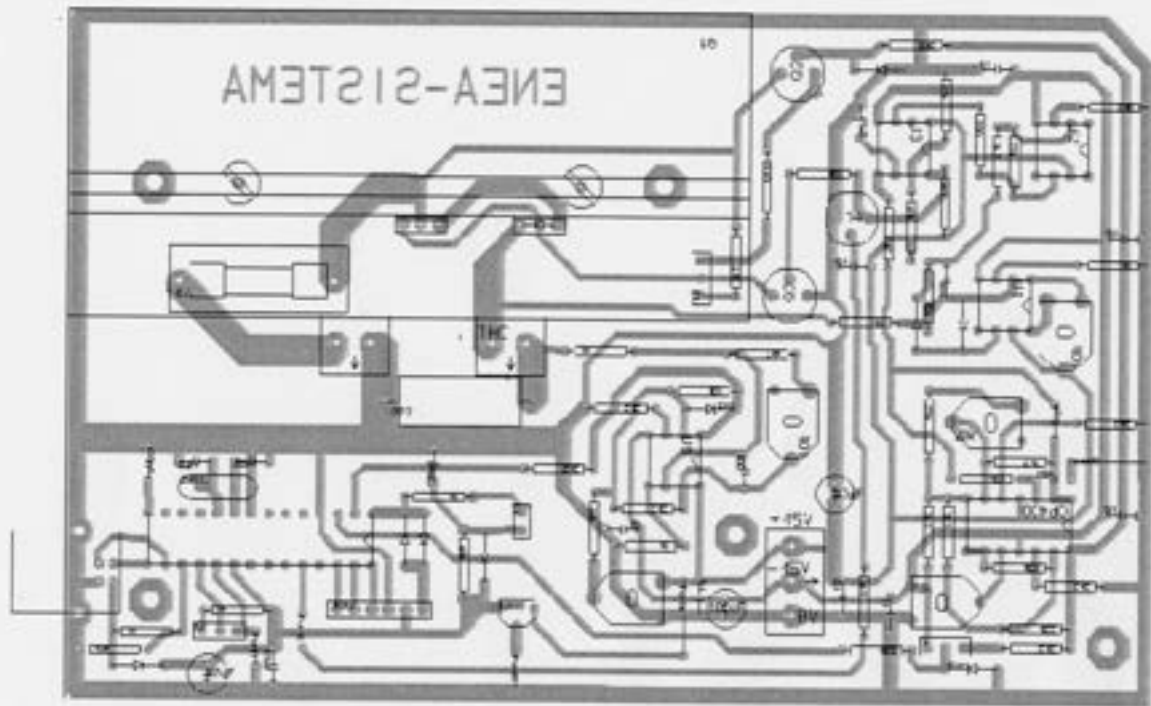
Circuito Stampato (visto in trasparenza)



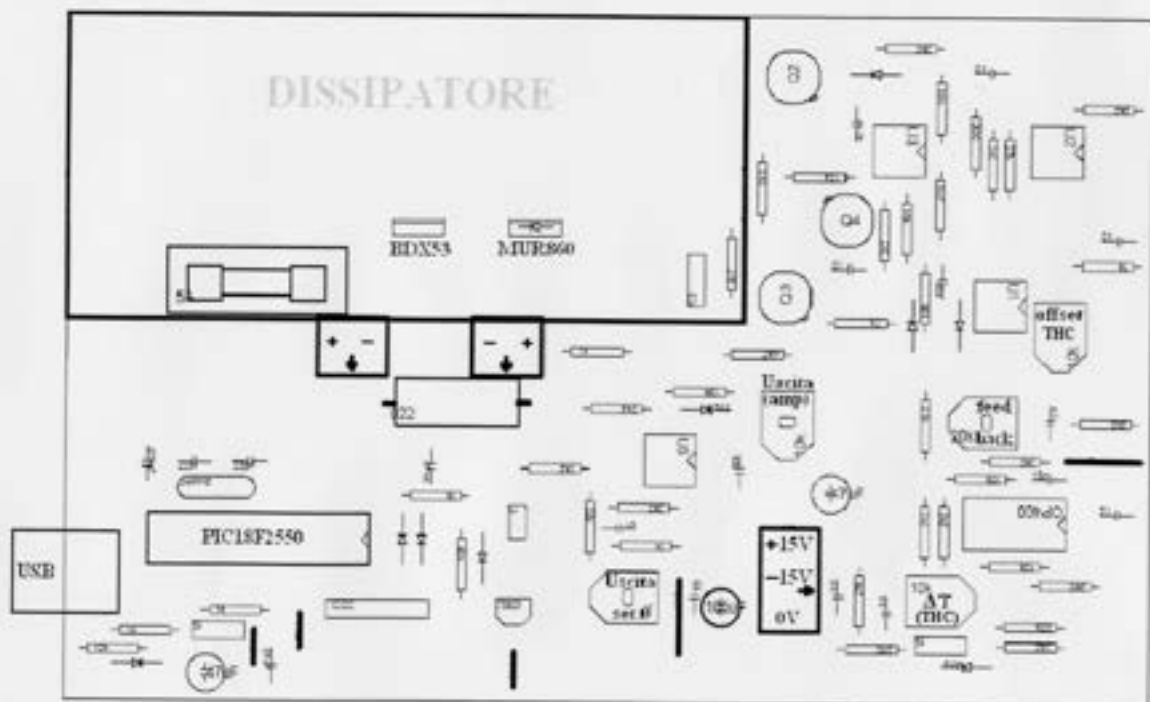
Lato saldatore



### Componenti e connessioni

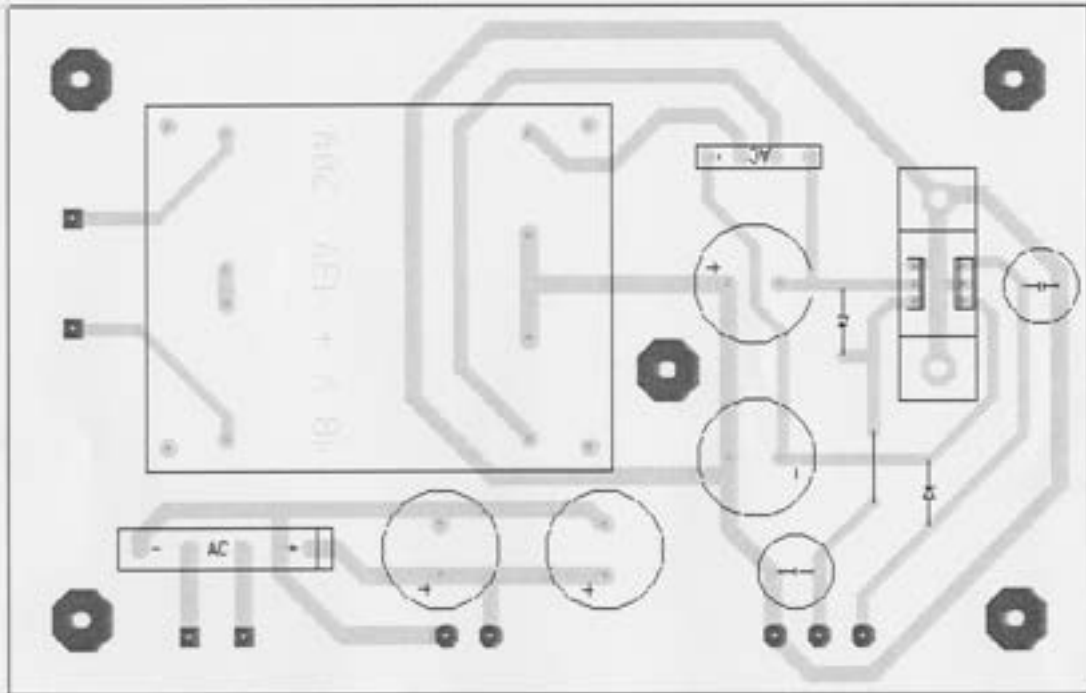


### Funzione dei Trimmer

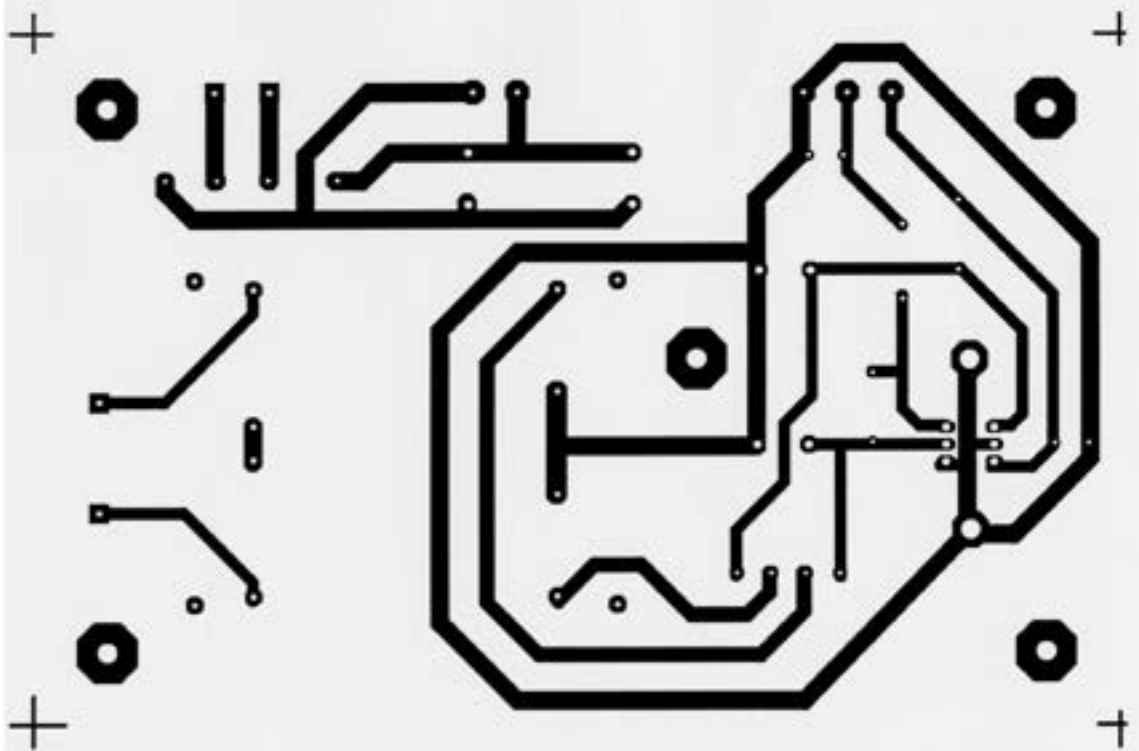


## Alimentatore THC

### Componenti

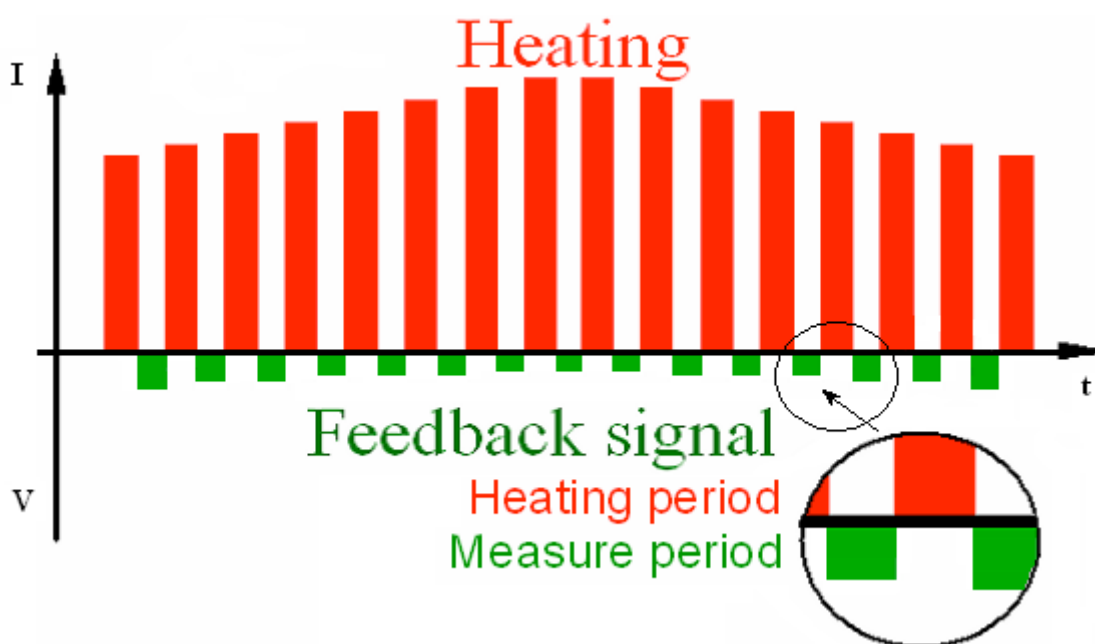


### Lato saldature



### 3. DESCRIZIONE DELLA CATENA DI MISURA PROGETTATA

La catena descritta è composta da una sonda e una elettronica di alimentazione e di controllo. La sonda realizzata in questo nuovo approccio è stata realizzata in varie forme e tipologie ed è comunque una termoresistenza riscaldata dalla corrente che scorre nello stesso filo termoelettrico grazie ad una gestione a divisione di tempo della termoresistenza vista come elemento riscaldante e come sensore. Dunque anche la filosofia di funzionamento a divisione di tempo rispecchia quella già sperimentata con le sonde a termocoppia riscaldata. Lo schema successivo descrive questo modo di operare. In rosso è rappresentata la corrente di riscaldamento ad impulsi ed in verde viene rappresentato il segnale di feedback letto dal valore di resistenza assunto dalla termoresistenza alla temperatura di funzionamento. Si nota bene l'effetto del feedback sulla corrente di riscaldamento. Questo grafico è un disegno che rispecchia fedelmente quanto misurato e visualizzato sugli strumenti oscillografici in laboratorio ed è stato realizzato per spiegare meglio il concetto del feedback legato al loop corrente di riscaldamento – valore resistivo della termoresistenza.



 <b>Ricerca Sistema Elettrico</b>	<b>Sigla di identificazione</b>	<b>Rev.</b>	<b>Distrib.</b>	<b>Pag.</b>	<b>di</b>
	NNFISS – LP2 - 028	0	L	9	19

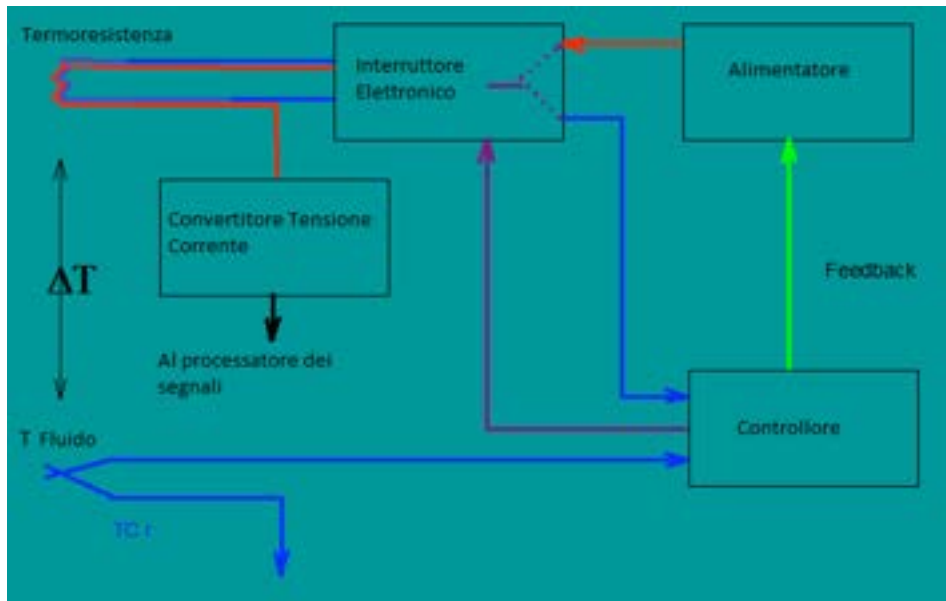
Lo schema a blocchi seguente descrive la filosofia di funzionamento, che risulta essere identica a quella provata con le termocoppie nella fase di studio precedente.

Come detto si è progettata una nuova elettronica di feedback riducendo i guadagni degli amplificatori ottenendo così una catena meno instabile e più insensibile ai rumori indotti ed auto-indotti. Si è cercato di filtrare i rumori inevitabilmente captati dall'elettronica per cercare di risolvere i problemi di instabilità che hanno afflitto le prove con sensori a termocoppia e si è curato particolarmente anche tutto lo schermaggio dei circuiti e dei cavi.

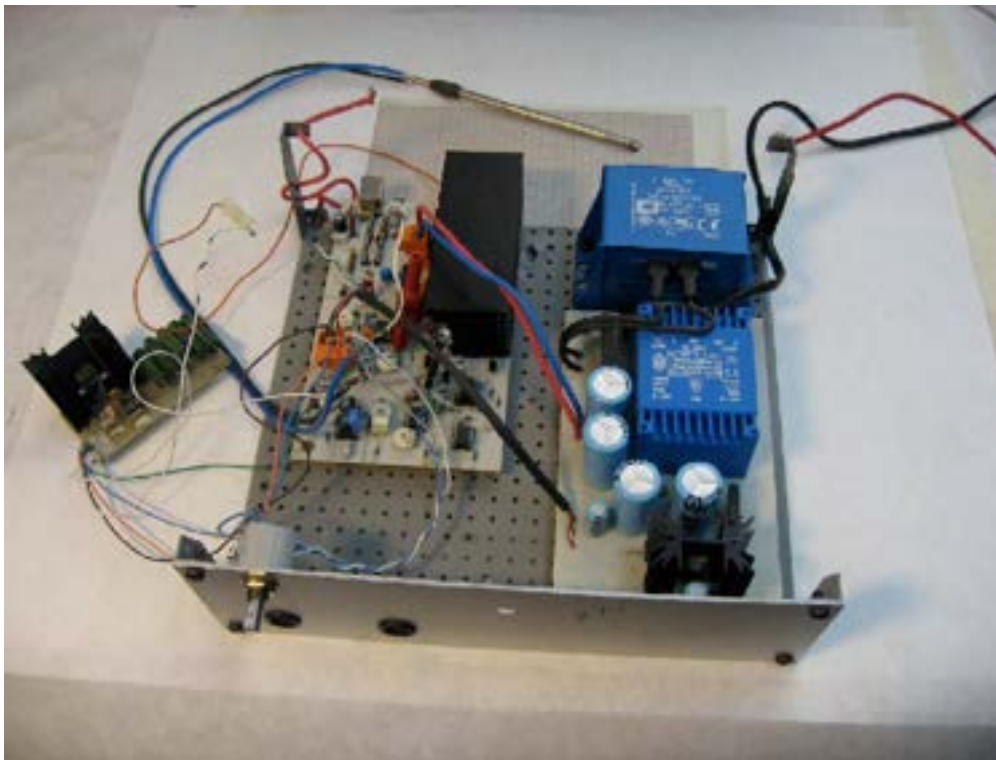
L'elettronica provvede inoltre a gestire la commutazione sulla termoresistenza, come avveniva per la sperimentazione precedente, dei circuiti di alimentazione e quelli di misura, il trattamento dei segnali e a chiudere il feedback tra il segnale di misura e il pilotaggio della corrente di riscaldamento.

La necessità di lavorare con un circuito stampato anche in questa fase di sviluppo e di ottimizzazione è scaturita dalla obbligatorietà di ridurre al massimo le possibilità di captazione di rumori elettromagnetici anche in considerazione del fatto che si sono utilizzate amplificazioni con guadagni e feedback comunque elevati. Si sono prese precauzioni per ridurre i rischi di instabilità ed oscillazioni curando particolarmente lo studio dei circuiti stampati e inserendo opportuni filtri e schermi elettrici di vario tipo e genere.


La temperatura della punta sensibile e quindi della termoresistenza è impostata ad un DT fisso rispetto alla temperatura ambiente. Misurando la corrente necessaria a mantenere questo DT costante si risale alla situazione fluidodinamica in cui è immersa la punta sensibile valutando quindi lo scambio termico della stessa che sarà maggiore all'aumentare della velocità del fluido.



SCHEMA A BLOCCHI DEL CIRCUITO ELETTRONICO



ELETTRONICA PROTOTIPALE ADATTATA ALLE TERMORESISTENZE

 <b>Ricerca Sistema Elettrico</b>	<b>Sigla di identificazione</b>	<b>Rev.</b>	<b>Distrib.</b>	<b>Pag.</b>	<b>di</b>
	NNFISS – LP2 - 028	0	L	11	19

#### 4. LE SONDE A TERMORESISTENZA A RISCALDAMENTO DIRETTO

Il sensore è costituito da una termoresistenza che viene usata in alternanza per la misura della temperatura, come variazione della sua resistenza secondo la legge di seguito ricordata e come riscaldatore della stessa punta sensibile. La termoresistenza, è anche chiamata termometro a resistenza o RTD ( Resistance Temperature Detector), è un sensore di temperatura che sfrutta la variazione della resistività di alcuni materiali al variare della temperatura. In particolare per i metalli esiste una relazione lineare che lega la resistività alla temperatura:

$$\rho(T) = \rho_0 \cdot [1 + \alpha(T - T_0)]$$

dove  $T$  è la temperatura,

$\rho(T)$  è la resistività del materiale alla temperatura  $T$ ,

$\rho_0$  è la resistività del materiale alla temperatura  $T_0$

$\alpha$  un coefficiente che dipende dal materiale.

Sfruttando la relazione che lega la resistenza e la resistività tramite la sezione  $S$  e la lunghezza  $L$  del conduttore, conosciuta come seconda legge di Hom:

$$R = \frac{\rho L}{S}$$

si ottiene:

$$R(T) = R_0 \cdot [1 + \alpha(T - T_0)]$$

 <b>Ricerca Sistema Elettrico</b>	<b>Sigla di identificazione</b>	<b>Rev.</b>	<b>Distrib.</b>	<b>Pag.</b>	<b>di</b>
	NNFISS – LP2 - 028	0	L	12	19

Da questa ultima relazione si può dunque risalire alla temperatura da una misura di resistenza ed è quello che viene fatto dalla nostra centralina elettronica.

In realtà la modellizzazione è più complessa, poiché anche la sezione e la lunghezza del conduttore aumentano con la temperatura, ma in modo molto meno significativo soprattutto nel caso di materiali opportunamente scelti.

Una relazione  $(T,R)$  con termini fino al terzo ordine, più accurata di quella lineare, è la seguente:

$$R(T) = R_0 \cdot [1 + \alpha_1(T - T_0) + \alpha_2(T - T_0)^2 + \alpha_3(T - T_0)^3]$$

in cui  $\alpha_1 > \alpha_2 > \alpha_3$

Il TCR (*Temperature Coefficient of Resistance*) di una termoresistenza indica la variazione media per grado centigrado del valore della resistenza fra gli 0 °C e i 100 °C. Può essere espresso con la formula:

$$TCR = \frac{R_{100} - R_0}{R_0 \times 100}$$

Il TCR viene indicato con  $\alpha$  perché coincide col coefficiente  $\alpha$  dell'equazione lineare che esprime R in funzione della temperatura.

Un maggiore valore di TCR indica una maggiore sensibilità dovuta ad una più grande purezza del platino usato che evita inquinanti che drogano il comportamento elettro-termico del platino.

In pratica il TCR viene usato per distinguere fra le varie curve resistenza/temperatura disponibili per le termoresistenze al platino, per le quali i valori variano da 0.00375 a 0.003928  $\Omega/\Omega/^\circ\text{C}$ . La norma IEC 751 prescrive per le Pt100 un TCR di 0.00385  $\Omega/\Omega/^\circ$ .

Sostanzialmente in commercio esistono vari tipi di termoresistenze, tra le più comuni si riscontrano le Pt 100 e le Pt 1000 relativamente con resistenza a 0 °C di 100  $\Omega$  e 1000  $\Omega$ .

Per i nostri utilizzi era necessario realizzare una termoresistenza con valori di resistenza molto più bassi per consentire un effetto Joule cospicuo visto che questo è proporzionale a  $I^2 \times R$ . e

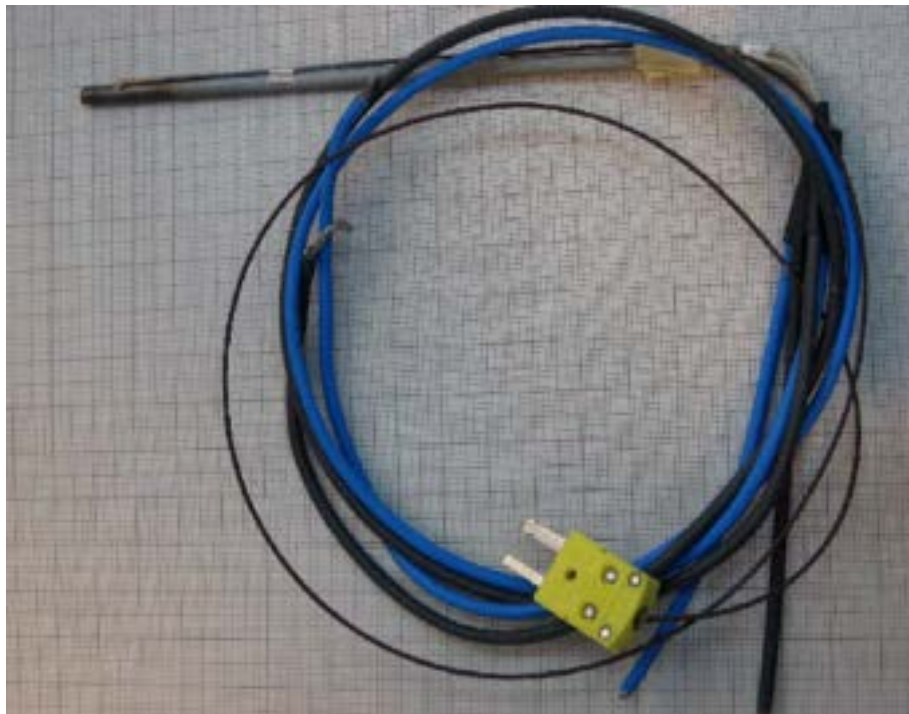
cioè  $V^2/R$  dove  $I$  è la corrente che scorre nel circuito elettrico di riscaldamento,  $V$  è la tensione ai suoi capi e  $R$  è la resistenza della termoresistenza su cui si sviluppa l'effetto Joule.

In aggiunta a questa termoresistenza si è approntata una termocoppia in grado di misurare la temperatura del fluido di misura per compensarne le sue variazioni. Sarà compito dell'elettronica, come è stato descritto in altro paragrafo, di commutare i circuiti di alimentazione della corrente di riscaldamento con quella di lettura della temperatura.

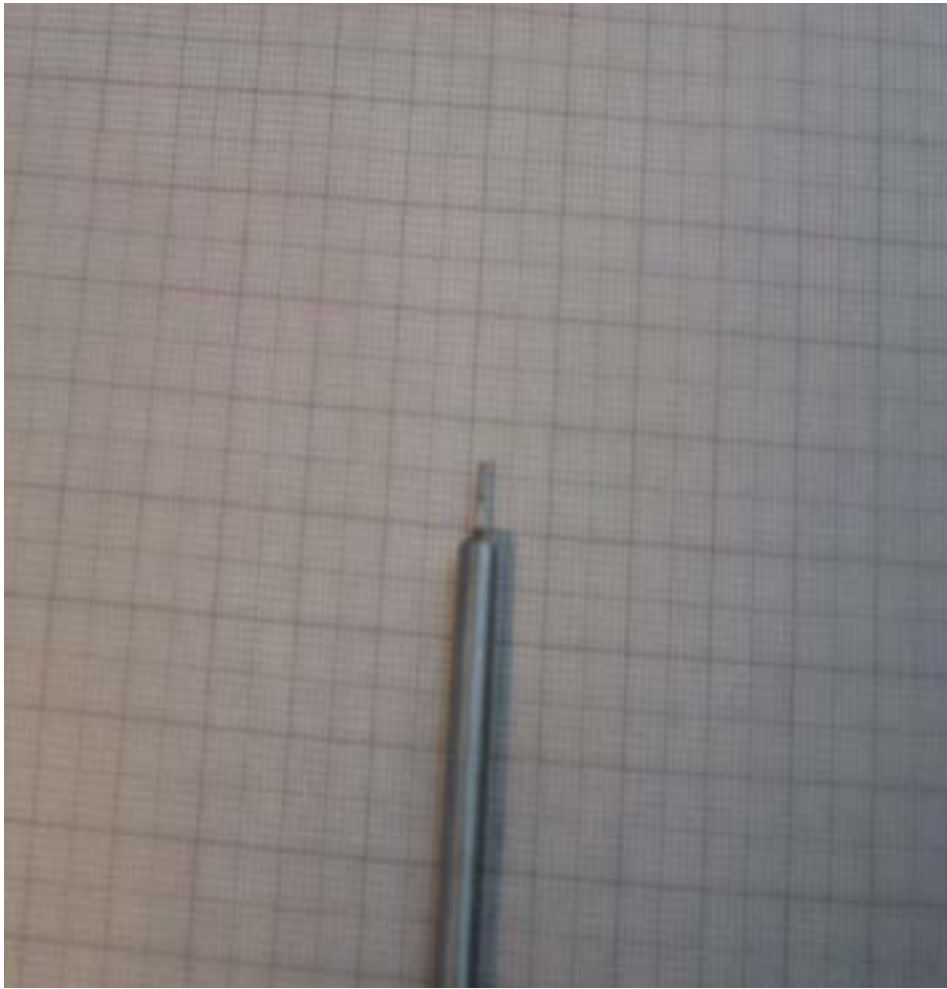
Queste sonde sono state già provate in con condizioni ambientali severe 180 °C e 360 bar e hanno alle spalle molte ore di lavoro senza che abbiano perso le loro caratteristiche originali di parametri elettrici e di resistenza termomeccanica. Hanno quindi superato abbondantemente i test di pre esercizio e di collaudo in ambienti severi.


Si riportano di seguito due fotografie raffiguranti due delle tante sonde a termoresistenza utilizzate nella sperimentazione.

La prima è una termoresistenza inguainata in un tubo in acciaio inox Ø est. da 4 mm e Ø int. da 3,5 mm, si nota anche la termocoppia brasata sulla superficie esterna del tubo dedicata alla misura della temperatura del volume di misura.



La seconda termoresistenza è realizzata in una guaina in acciaio inox Ø est. da 3 mm e Ø int. da 2,5 mm, la termocoppia non è visibile in quanto è anch'essa inguainata.



 <b>Ricerca Sistema Elettrico</b>	<b>Sigla di identificazione</b>	<b>Rev.</b>	<b>Distrib.</b>	<b>Pag.</b>	<b>di</b>
	NNFISS – LP2 - 028	0	L	15	19

## 5. SONDE A TERMORESISTENZA


Come detto le sonde a termoresistenza sono state realizzate nei laboratori ENEA e non sono di tipo commerciale in quanto dovevano rispondere a requisiti e specifiche tecniche ben precise ed adeguate sia nei parametri elettrici che fisico meccanici. Dovevano avere una resistenza dell'ordine di pochi  $\Omega$ , avere le dimensioni più piccole possibili, e consentire la brasatura di una micro termocoppia dedicata alla misura della temperatura del fluido presente nel volume di misura per consentire, come detto, la compensazione delle sue variazioni.

Infatti la misura della velocità viene fatta andando a misurare la corrente necessaria a mantenere un  $\Delta T$  tra la punta sensibile e l'ambiente di misura. Il feedback viene chiuso tra la misura di temperatura della sonda a termoresistenza fatta in modo indiretto e cioè utilizzando la tabella di conversione Resistenza – Temperatura e l'impostazione della corrente necessaria a mantenere il  $\Delta T$  al valore pre impostato.

Sono state realizzate varie termoresistenze con la stessa tecnologia costruttiva e cioè avvolgendo a spirale un filo di platino di vari diametri su di un supporto tondo di allumina ( $Al_2O_3$ ) elettricamente isolante ma termicamente buon conduttore.

Questo filo avvolto è stato fermato con opportuno cemento ad alta temperatura misto con nitrato di boro. A seconda del diametro del filo di platino utilizzato e della sua lunghezza si sono ottenute termoresistenze di valore vario oscillanti da 2,95  $\Omega$  a 4  $\Omega$ .

Sulle guaine realizzate in acciaio inox  $\varnothing$  est. da 3 a 4 mm e  $\varnothing$  int. da 2,5 a 3,5 mm che incapsulano le termoresistenze di cui si sono descritte le realizzazioni precedentemente, sono state brasate sotto vuoto le micro termocoppie di tipo K Cr-Al dedicate alla misura della temperatura del volume di misura.

 <b>Ricerca Sistema Elettrico</b>	<b>Sigla di identificazione</b>	<b>Rev.</b>	<b>Distrib.</b>	<b>Pag.</b>	<b>di</b>
	NNFISS – LP2 - 028	0	L	16	19

## 6. PROVE SPERIMENTALI DI LABORATORIO

Una volta realizzata l'elettronica prototipale su circuito stampato, studiato, realizzato e fornito da SISTEMA s.r.l. si è provveduto al montaggio in un contenitore che prevedeva anche i circuiti di alimentazione. Si sono provate in successione tutte le sonde precedentemente descritte e con l'ausilio di strumentazione di laboratorio si è cercato di ottimizzare le tarature dei guadagni degli amplificatori e si è cercato di estrarre un segnale lineare utile capace di descrivere la variazione dello scambio termico della sonda al variare della velocità del fluido nel quale essa è immersa.

Queste prove sono state effettuate con le varie sonde montate su di un circuito idraulico studiato in modo da poter variare con facilità la velocità del fluido in misura e in modo da avere a portata di mano sia il laboratorio di elettronica che quello per lo sviluppo delle sonde.

La foto seguente rappresenta questo circuito che tramite una pompa e una valvola consente di creare un battente variabile tra le due parti dell'impianto, separate da un setto forato nel quale è infilato il tubo che racchiude il volume di misura utilizzato per stabilizzare il flusso. In questo tubo è praticata la penetrazione utilizzata per l'inserimento della sonda. La valvola consente di modulare la velocità dell'acqua all'interno del tubo variando il battente.

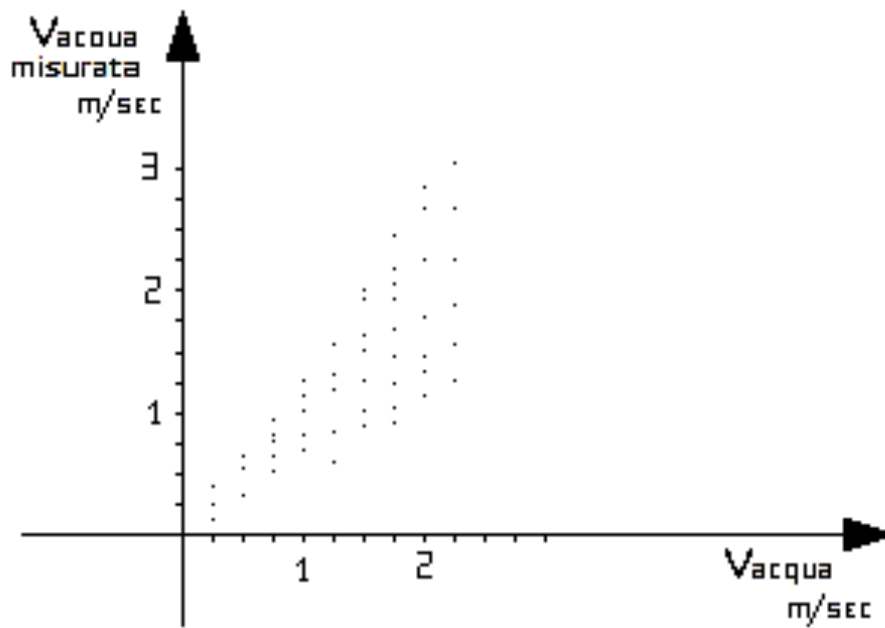
Si è fatta una taratura della sonda calcolando una tabella di conversione resistenza letta/velocità stimata e si è quindi passati alla fase sperimentale che prevedeva di provare le sonde prima in laboratorio installate sull'impianto della fotografia precedente e poi di passare ad effettuare una campagna sperimentale di calibrazione sull'impianto VASIB presente c/o il C.R. Casaccia in grado di provare le sonde anche a temperature e pressioni più elevate.




Il grafico seguente riassume e sintetizza i risultati ottenuti nelle prove sperimentali a freddo (acqua a temperatura ambiente).

Si è proceduto impostando le velocità regolando la valvola presente all'uscita della pompa dell'impianto di prova raffigurato nella precedente fotografia. Queste velocità sono state impostate con valori che vanno da 0,25 m/sec fino a 2 m/sec con un passo di 0,25 m/sec.

Come si può osservare dai risultati riportati nel grafico seguente si ha una dispersione molto ampia e crescente al crescere della velocità delle misure effettuate. Questa dispersione rende poco ripetibile la misura.



 <b>Ricerca Sistema Elettrico</b>	<b>Sigla di identificazione</b> NNFISS – LP2 - 028	<b>Rev.</b> 0	<b>Distrib.</b> L	<b>Pag.</b> 19	<b>di</b> 19
--	---	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

## 7. CONCLUSIONI

I precedenti risultati dimostrano che la catena di misura ottenuta dopo questa attività di ricerca non è idonea ad effettuare misure di velocità di fluidi per le caratteristiche di poca ripetibilità nelle misure. Per contro la ricaduta di questi sforzi è sicuramente quella di aver ottimizzato e realizzato una catena di misura capace di leggere transizioni aria-acqua in 15msec e di acqua-aria di 20msec di gran lunga migliori della catena di misura da cui si è partiti.