

Instituto Militar de Engenharia - IME, no Rio de Janeiro.

07 e 10 de junho de 2005,

Medição On-Line de Propriedades Termofísicas para Controle de Qualidade em Processos Industriais

Paulo Seleglim Júnior

NETeF/EESC/USP

seleglim@sc.usp.br

NETef

Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos
EESC - USP



www.netef.eesc.sc.usp.br

Controle de qualidade em processos contínuos

Motivação:

Especificações de produção:

$$\rho_{\min} \leq \rho \leq \rho_{\max}$$

$$\mu_{\min} \leq \mu \leq \mu_{\max}$$

...

$$k_{\min} \leq k \leq k_{\max}$$

propriedades físicas, químicas
ópticas, elétricas, térmicas, etc.

Controle de qualidade:

off-line: amostragem seguida de ensaios em laboratório

on-line: medição direta em processo ("em fluxo")

Gasolina padrão ANP

CARACTERÍSTICAS	UNIDADES	LIMITES	MÉTODOS	
			ABNT NBR	ASTM D
Aspecto		Aprovada (1)	14954 (2)	4176 (2)
Teor de Álcool Etilico Anidro Combustível - AEAC (3)	% volume	22 ± 1	NBR 13992	
Massa específica a 20°C	kg/m ³	735,0 a 765,0	7148 14065	1298 4052
Destilação	°C		9619	86
PIE (Ponto Inicial de Ebulição)		30,0 a 40,0		
10% vol., evaporados		45,0 a 60,0		
50% vol., evaporados		70,0 a 80,0		
90 % vol., evaporados		150,0 a 180,0		
PFE (Ponto Final de Ebulição)		190,0 a 215,0		
resíduo, máx	% volume	2,0		
Nº de Octano Motor - MON	-	82,0 a 84,0	MB 457	2700
Nº de Octano Pesquisa - RON	-	93,0 a 98,0		2699
Pressão de vapor a 37,8°C,	kPa	54,0 a 64,0	14149 - 14156 -	4953 5190 5191 5482
Goma atual lavada, máx.	mg/100 mL	5,0	14525	381
Período de indução a 100°C, min.	min	1000	14478	525
Corrosividade ao cobre, 3h a 50°C,	-	1	14359	130
Enxofre, máx.	% massa	0,04	6563 - - 14533 -	1266 2622 3120 4294 5453
Chumbo, máx. (4)	g/L	0,005	-	3237
Hidrocarbonetos:				
Aromáticos, máx. (5)	% vol.	40,0	14932	1319
Olefinicos, máx. (5)	% vol.	20,0		

Métodos
off-line

Medições off-line

Vantagens:

- ✓ valores obtidos extremamente precisos
- ✓ conformidade com as normas de produção
- ✓ arquivo de "testemunhas" (valor jurídico)

Desvantagens:

- ✓ amostragem e manipulação laboriosas
- ✓ resultados demorados com perda de produção
- ✓ altos custos operacionais (equipamentos e pessoal)

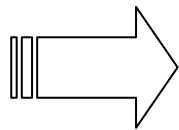
Medições on-line

Vantagens:

- ✓ não são feitas amostras e não há manipulação
- ✓ resultados obtidos instantaneamente
- ✓ baixos custos operacionais (automação)

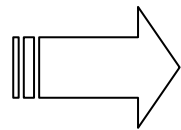
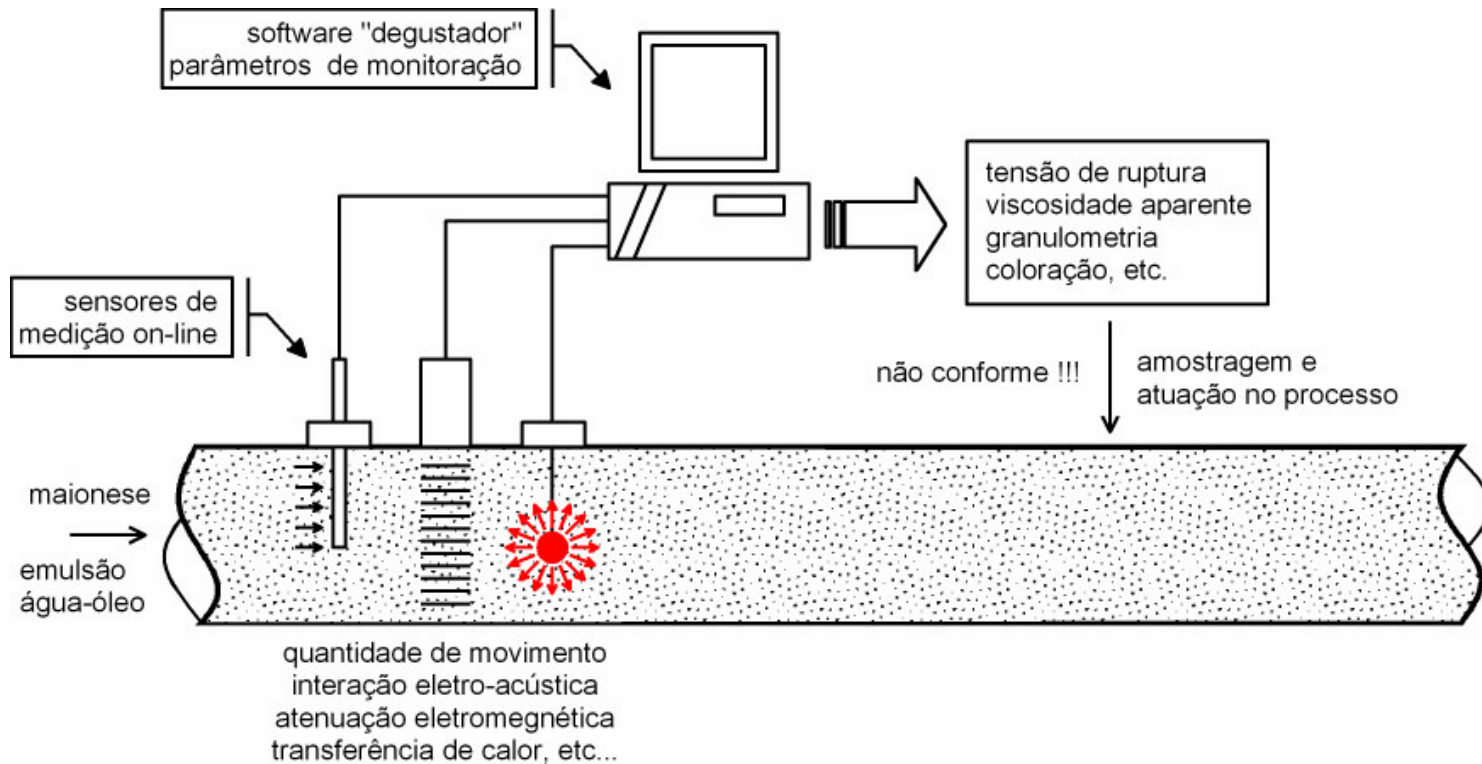
Desvantagens:

- ✓ medidas indiretas das grandezas analisadas
- ✓ não há "testemunhas"
- ✓ não conformidade com as normas de produção...



Estratégia de monitoração da qualidade e de "disparo" de procedimentos de controle a partir de testes off-line normatizados

Implementação da estratégia on-line



Como relacionar a interação com os campos de sensoriamento às propriedades físico-químicas a serem monitoradas ???

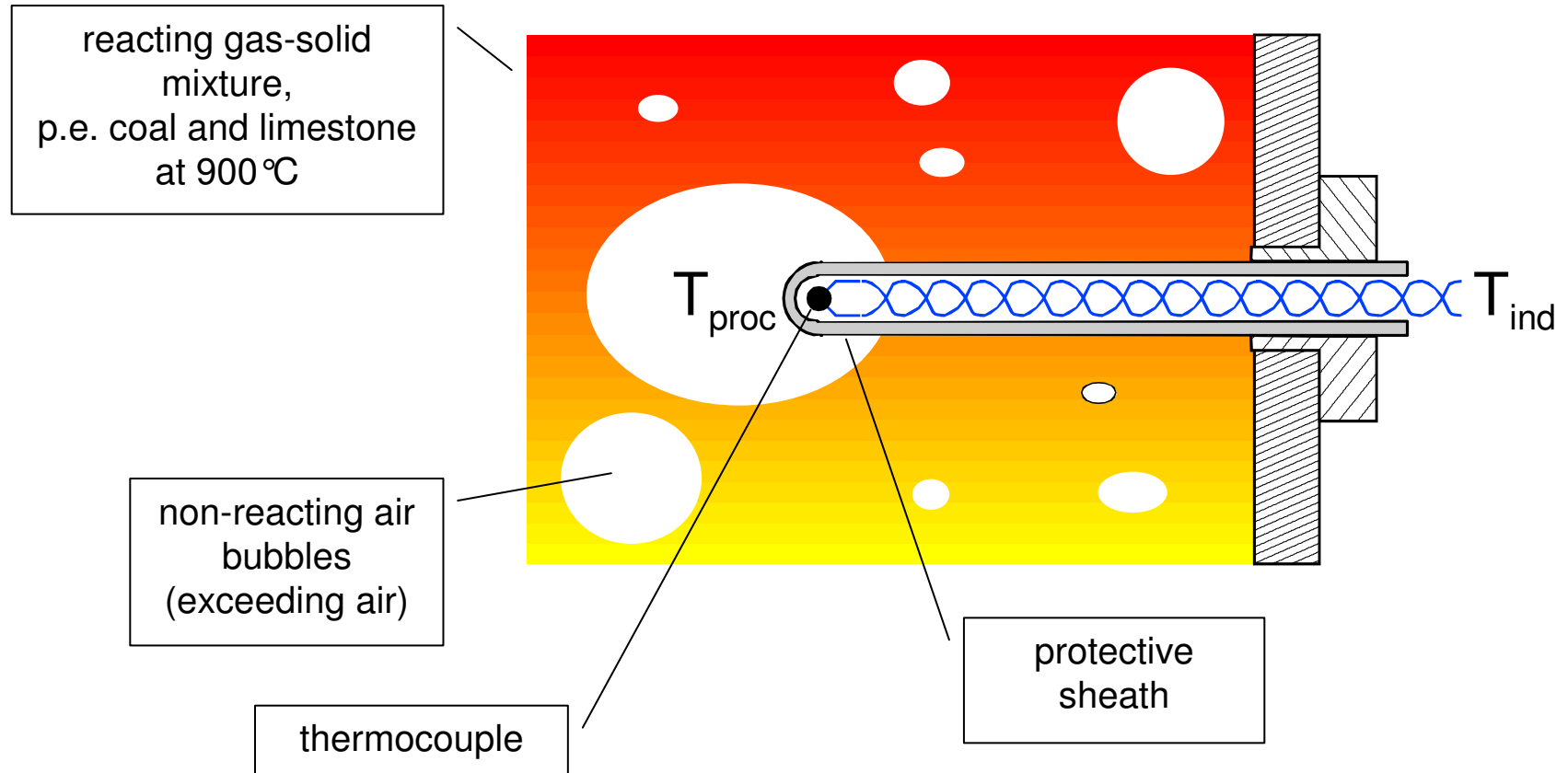
Sensoriamento e propriedades relacionadas

- 1) Sonda "inteligente" de temperatura
- 2) Monitoração do coeficiente de convecção
- 3) Densímetro e viscosímetro acústicos
- 4) Sondas de impedância elétrica
- 5) Outros...

Sensoriamento e propriedades relacionadas

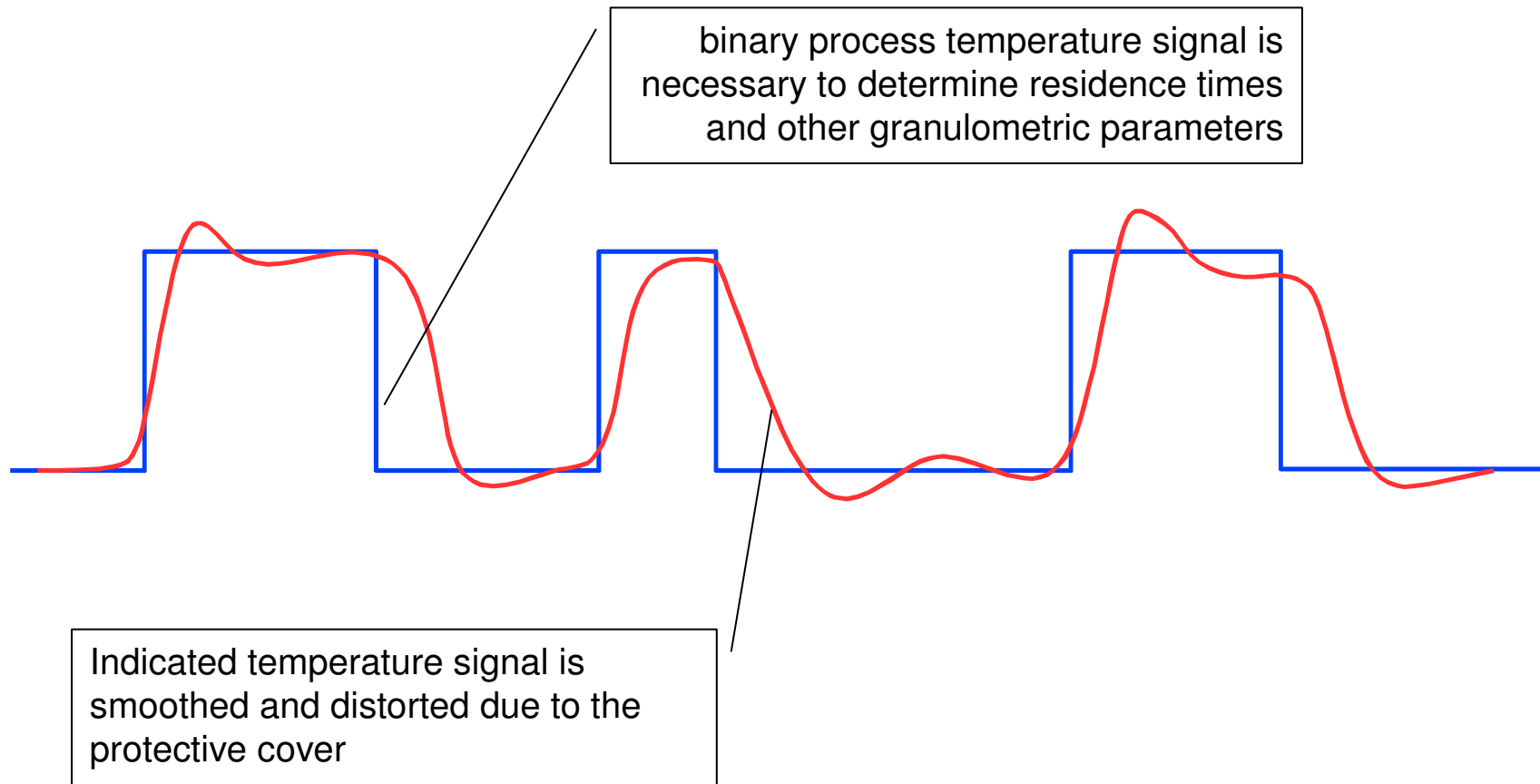
Sonda inteligente de temperatura

Motivação: operação de reatores de leito fluidizado



Sonda inteligente de temperatura

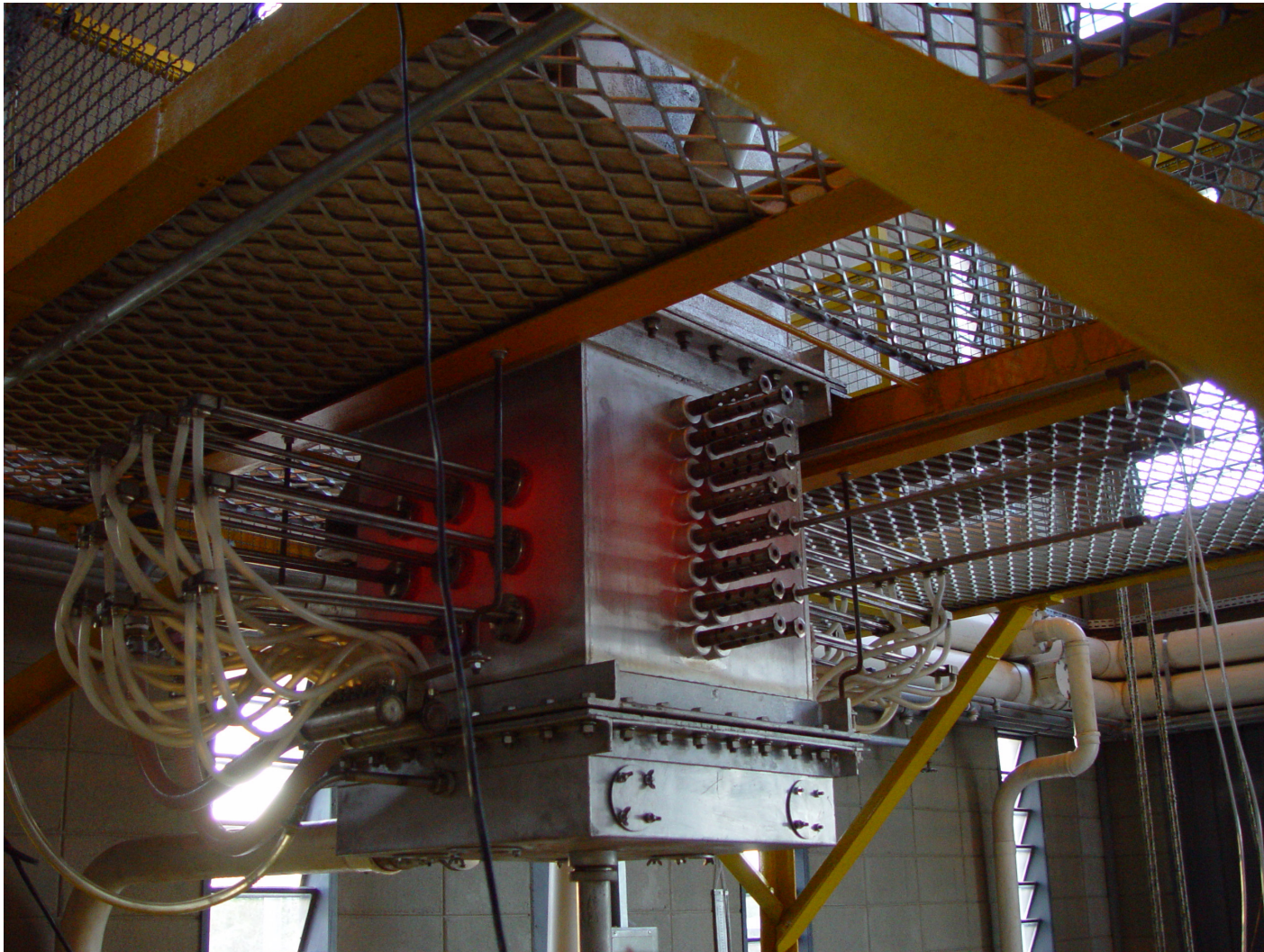
Operação de reatores de leito fluidizado:



Reator de leito fluidizado

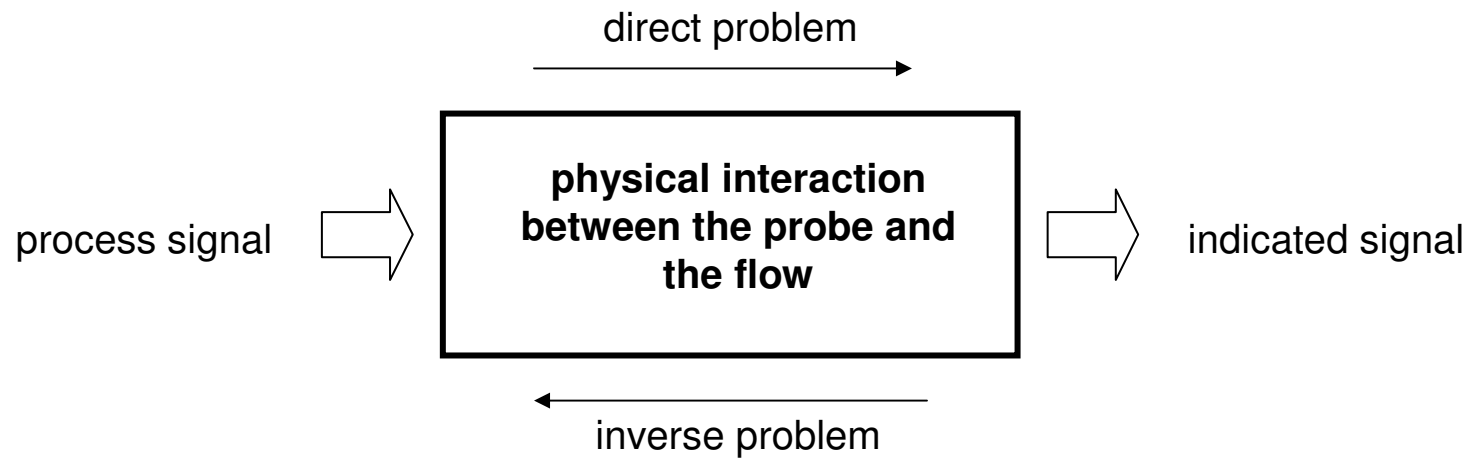


Reator de leito fluidizado



Sonda inteligente de temperatura

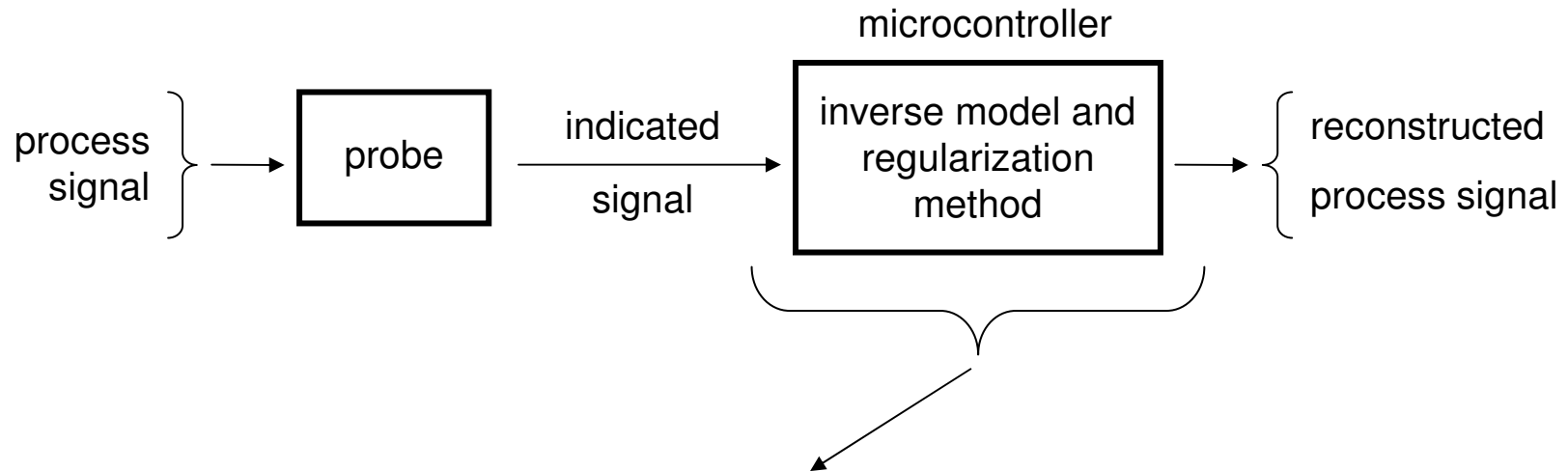
direct and inverse problems



**a microcontroller can be used to reconstruct
the process signal from the indicated signal**

Sonda inteligente de temperatura

principle of operation



the inverse model and all necessary regularization procedures must fit into the microcontroller's memory

Sonda inteligente de temperatura

transduction models

$$MC \frac{dT_{\text{ind}}}{dt} - hA(T_{\text{proc}} - T_{\text{ind}}) - \varepsilon\sigma A(T_{\infty}^4 - T_{\text{ind}}^4) = 0$$

$$\tau \frac{dT_{\text{ind}}}{dt} - (T_{\text{proc}} - T_{\text{ind}}) - \gamma(T_{\infty} - T_{\text{ind}}) = 0$$

$$\tau = \frac{MC}{hA} \quad \gamma \cong \frac{4\varepsilon\sigma}{h} \left(\frac{T_{\infty} + T_{\text{ind}}}{2} \right)^3$$

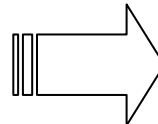
Sonda inteligente de temperatura

unconditioned solution of the inverse problem

$$T_{\text{proc}} = T_{\text{ind}} + \tau \frac{dT_{\text{ind}}}{dt} - \gamma(T_{\infty} - T_{\text{ind}}) \quad \dots \tau \text{ and } \gamma \text{ are calibrated experimentally}$$

first order finite differences scheme

$$t_n = n \Delta t, \quad n=0,1,2,\dots$$


$$T_{\text{proc},n} = \frac{\tau_n}{\Delta t} (T_{\text{ind},n} - T_{\text{ind},n-1}) + T_{\text{ind},n} - \gamma_n (T_{\infty} - T_{\text{ind},n})$$

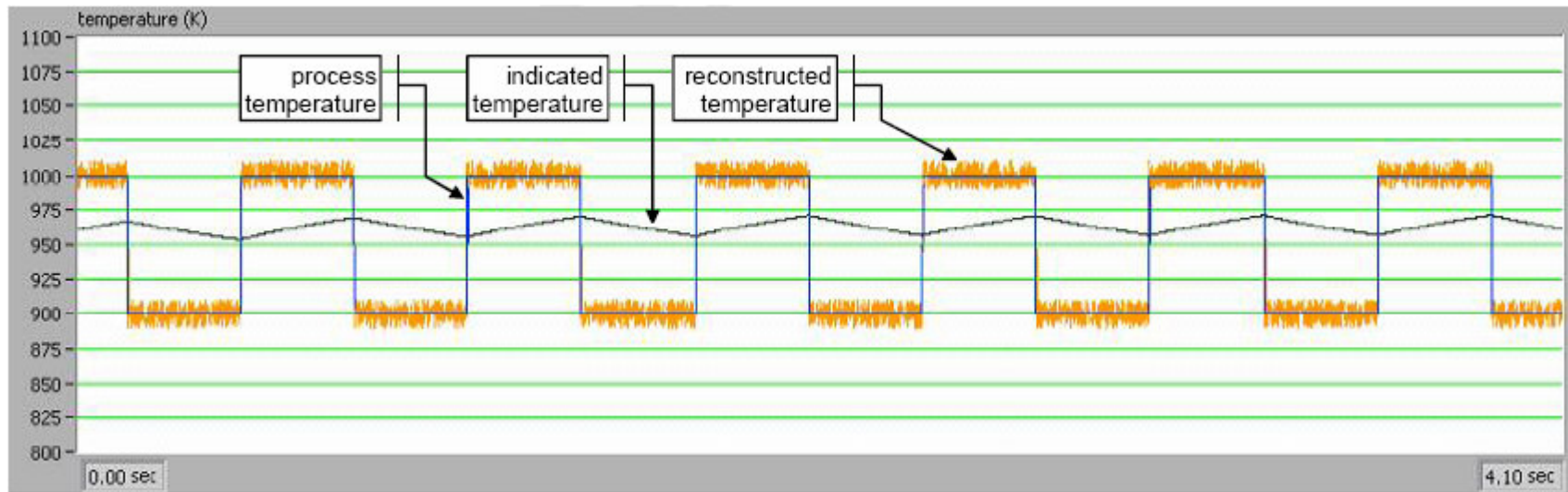
Sonda inteligente de temperatura

synthetic data:

process temperature is a square wave between 900 and 1000 K

indicated temperature is corrupted with **0.01 K** random noise

reconstructed temperature has a noise level of 25 K approximately !

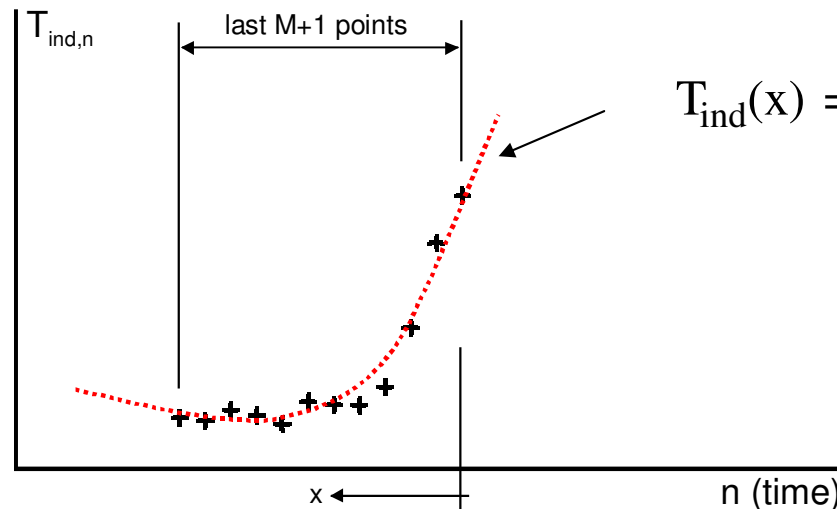


Sonda inteligente de temperatura

conditioned solution of the inverse problem

$$T_{\text{proc}} = T_{\text{ind}} + \tau \frac{dT_{\text{ind}}}{dt} - \gamma(T_{\infty} - T_{\text{ind}}) \quad \Rightarrow \quad T_{\text{proc}} = a_{0,n} - \tau a_{1,n} - \gamma(T_{\infty} - a_{0,n})$$

where a_0 and a_1 are respectively the first and the second coefficients of the least square polynomial adjusting the last $M+1$ temperature measurements



$$T_{\text{ind}}(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_N x^N, \quad x=0,1,2,\dots$$

$$\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} a_0 = T_{\text{ind},n} \\ a_1 = -\tau \frac{dT_{\text{ind},n}}{dt} \end{array} \right.$$

Sonda inteligente de temperatura

a_0 and a_1 are calculated according with:

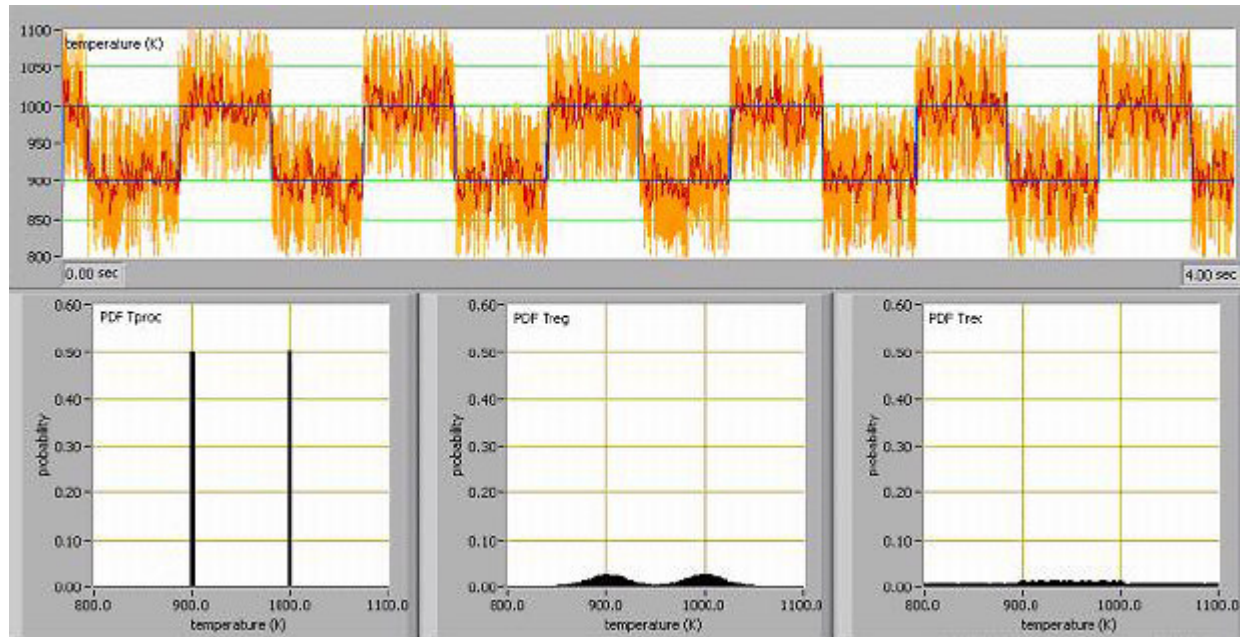
$$\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{k=0}^M w_k & \sum_{k=0}^M w_k k & \cdots & \sum_{k=0}^M w_k k^N \\ \sum_{k=0}^M w_k k^1 & \sum_{k=0}^M w_k k^2 & \cdots & \sum_{k=0}^M w_k k^{N+1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sum_{k=0}^M w_k k^N & \sum_{k=0}^M w_k k^{N+1} & \cdots & \sum_{k=0}^M w_k k^{2N} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum_{k=0}^M w_k T_{ind,k} \\ \sum_{k=0}^M w_k k^1 T_{ind,k} \\ \vdots \\ \sum_{k=0}^M w_k k^N T_{ind,k} \end{bmatrix}$$

pode ser calculada
previamente porque não
depende dos valores de T_{ind}

obs.: w_k are convenient weighting coefficients

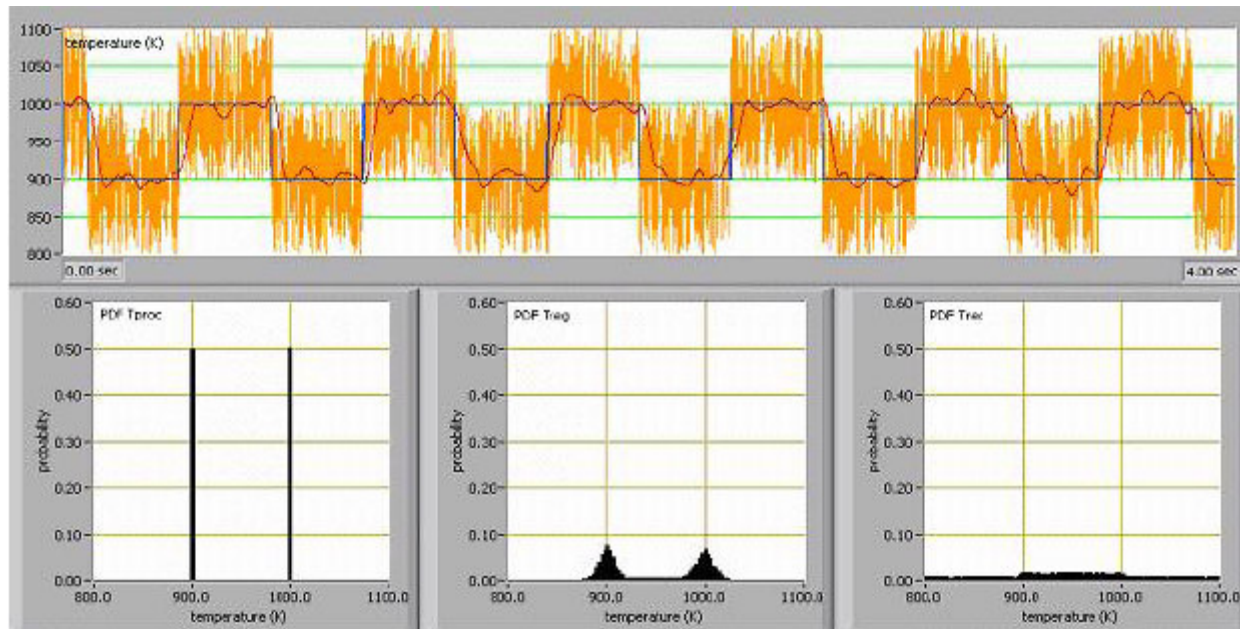
Validation tests (synthetic data)

number of adjusted temperature measurements = 10



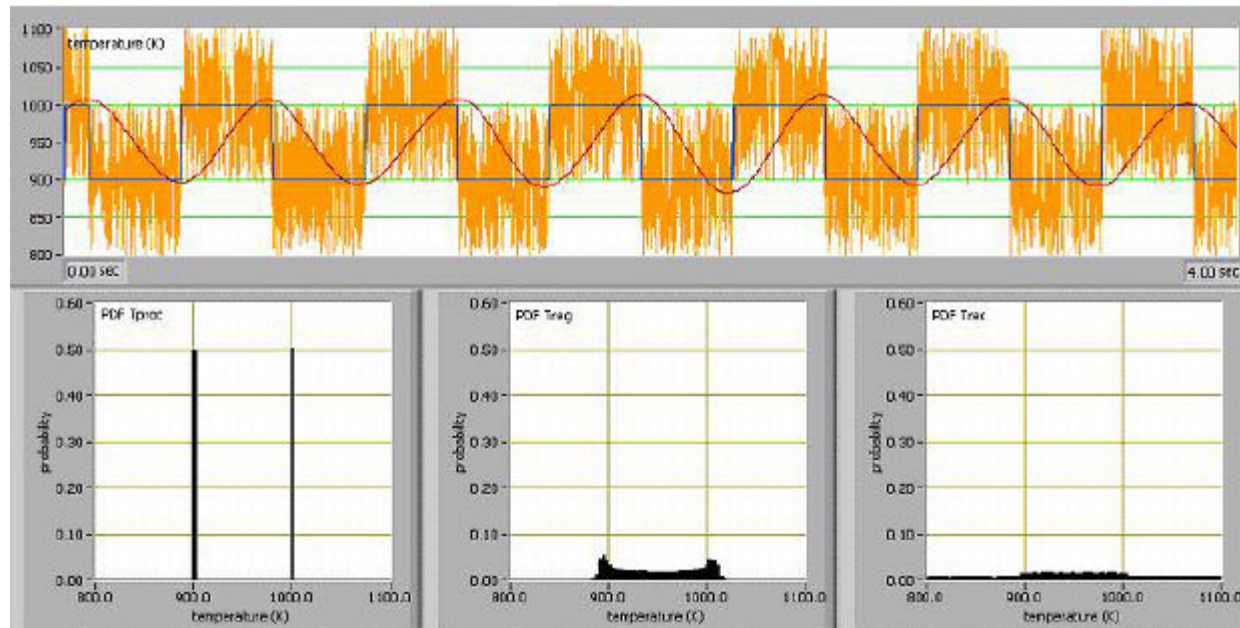
Validation tests (synthetic data)

number of adjusted temperature measurements = 60

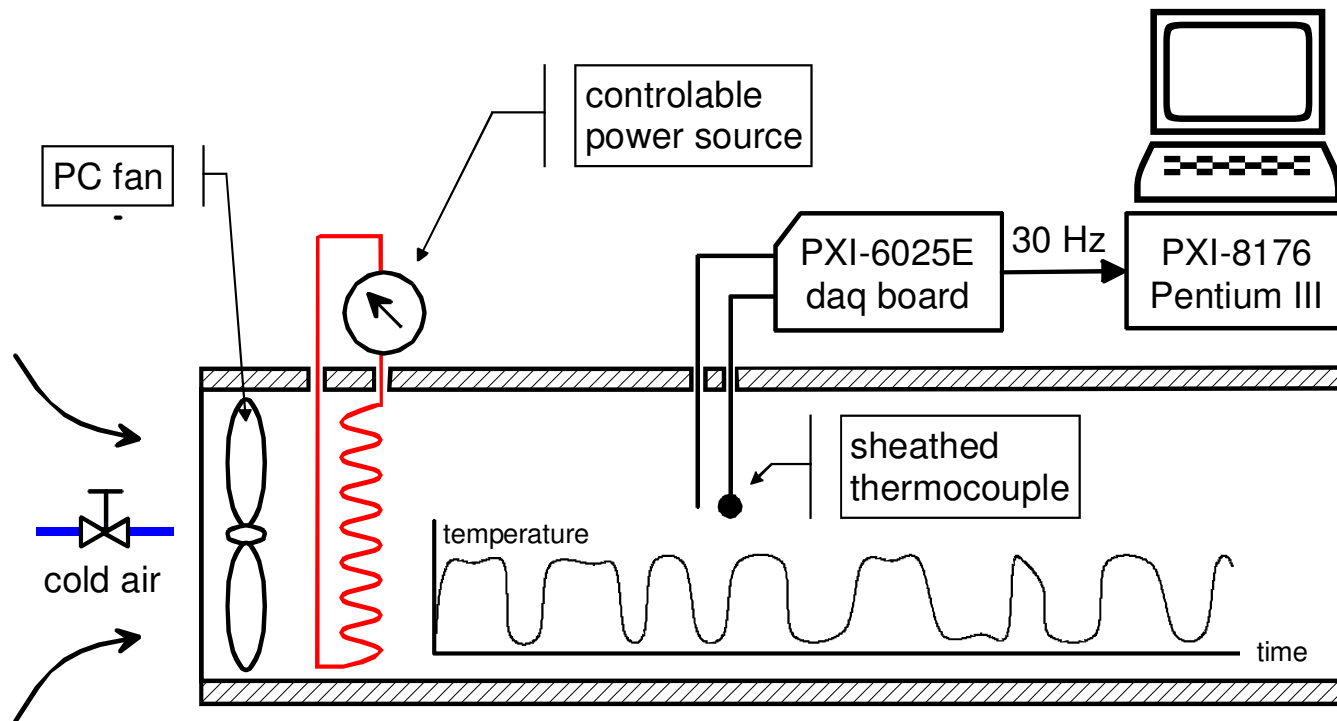


Validation tests (synthetic data)

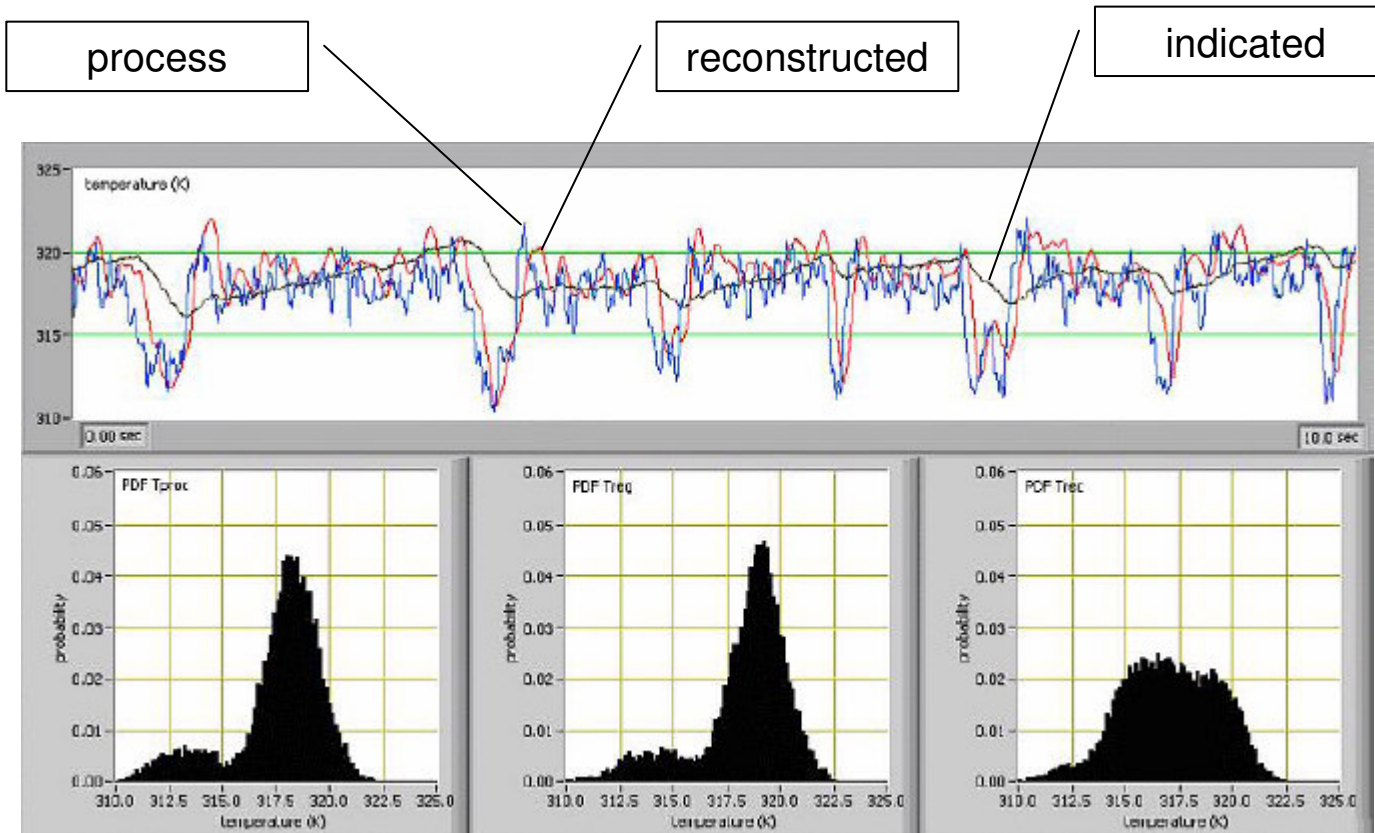
number of adjusted temperature measurements = 300



Validation tests (experimental data)



Validation tests (experimental data)



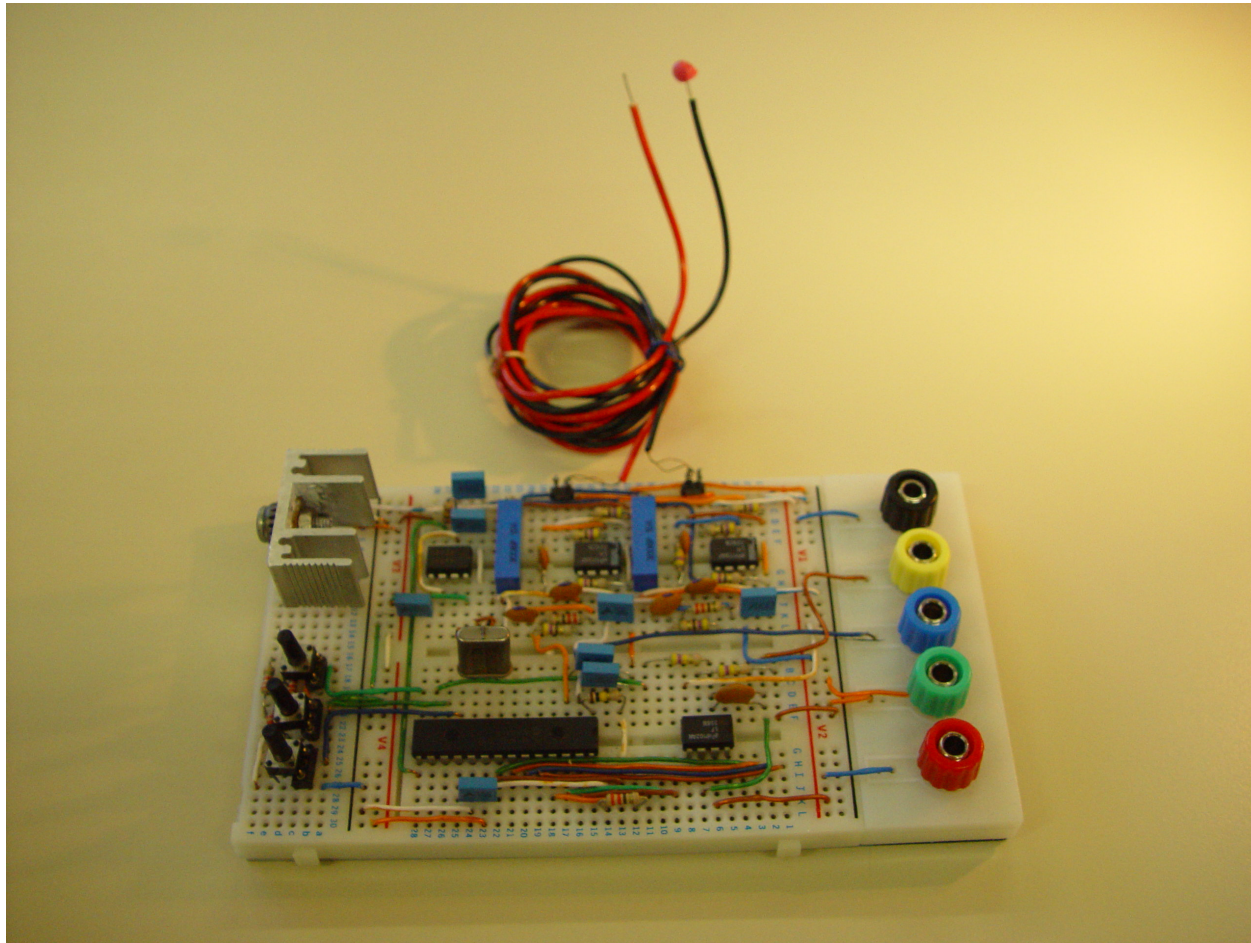
Validation tests (experimental data)

statistical analysis of the difference between the reference and the reconstructed signals

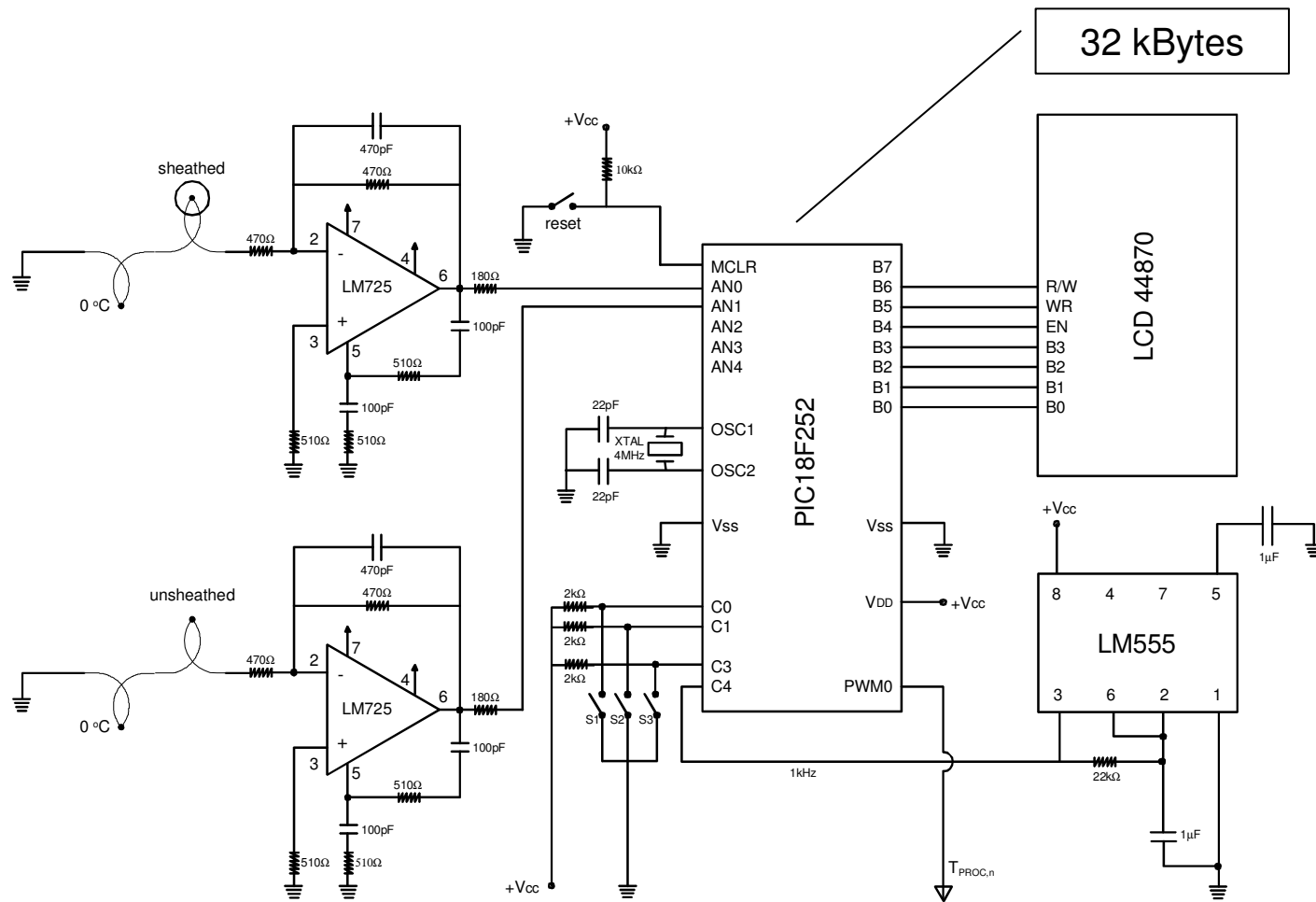
statistical moment	T_{ref}	T_{proc} (eq. 13)			
		M+1 = 3	M+1 = 25	M+1 = 45	M+1 = 60
mean (K)	317.6	317.2	317.9*	318.6	318.3
std. deviation (K)	2.126	1.881	2.307	2.213*	2.368
skewness (K^3)	-12.53	-3.130	-13.08*	-14.68	-17.27
kurtosis (K^4)	89.82	41.52	100.9	97.68*	143.3

they are statistically equivalent within ± 6.9 K confidence interval ($\pm 2.2\%$)

Hardware implementation



Hardware implementation



Sensoriamento e propriedades relacionadas

Monitoração do coeficiente de convecção

