

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

BR 8921146

INIS-BR--1629

**DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE RESPOSTA DE SENSORES DE TEMPERATURA
DO TIPO RTD ATRAVÉS DE MEDIDAS IN SITU**

IRACI MARTINEZ PEREIRA GONÇALVES

**Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Mestre em Tecnologia Nuclear.**

Orientador: Dr. Artur José Gonçalves Faya



SÃO PAULO

1985

A meus pais

Meus Agradecimentos

- a Adalberto José Soares;
- ao Sr. Rubens e pessoal do galpão, pela ajuda na montagem do equipamento experimental;
- a Tufic e Kassar, do laboratório Van Der Graaf.

DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE RESPOSTA DE SENSORES DE TEMPERATURA DO TIPO RTD ATRAVÉS DE MEDIDAS IN SITU.

IRACI M. P. GONÇALVES

RESUMO

O teste de resposta a um degrau de corrente permite de terminar a constante de tempo de sensores de temperatura do tipo RTD. O teste envolve o aquecimento do sensor de uns poucos graus acima da temperatura local, através de um aumento, em forma de degrau, da corrente elétrica que passa pelos seus terminais. A transformação matemática desenvolvida permite prever a resposta do sensor a uma mudança na temperatura do fluido, através de dados coletados durante o transiente de aquecimento interno.

Os resultados experimentais obtidos neste trabalho mostram que através deste método, a constante de tempo de um sensor do tipo RTD pode ser determinada com precisão superior a 15%.

O teste de resposta a um degrau de corrente é um teste remoto, realizado com o sensor instalado, e portanto considera as condições locais de transferência de calor, sendo apropriado para centrais nucleares, onde os sensores são instalados em pontos de difícil acesso.

IN SITU RESPONSE TIME MEASUREMENTS OF RTD TEMPERATURE SENSORS.

IRACI M. P. GONÇALVES

A B S T R A C T

The loop-current-step-response test provides a mean for determining the time constant of resistance thermometers.

The test consists in heating the sensor a few degrees above ambient temperature by causing a step perturbation in the electric current that flows through the sensor leads. The developed mathematical transformation permits to use data collected during the internal heating transient to predict the sensor response to perturbations in fluid temperature.

Experimental data obtained show that the time constant determined by this method is within 15 percent of the true value.

The loop-current-step-response test is a remote in situ test, which can be performed with the sensor installed in the process. Consequently it takes into account the local heat transfer conditions, and is appropriated for nuclear power plants, where sensors are installed in points of difficult access.

ÍNDICE

	Pag.
1. INTRODUÇÃO	1
2. HISTÓRICO	3
3. RESUMO TEÓRICO	7
3.1 RTD - Princípio de funcionamento e caracterís_ ticas gerais	7
3.2 Medida de resistência	14
3.3 Constante de tempo	17
3.4 Teste de imersão rápida	19
3.5 Teste de resposta a um degrau de corrente	20
3.6 Relação entre teste de imersão rápida e teste de resposta a um degrau de corrente	21
4. MODELO MATEMÁTICO PARA TESTE DE IMERSÃO RÁPIDA E TESTE DE RESPOSTA A UM DEGRAU DE CORRENTE	23
4.1 Modelo dinâmico proposto	23
4.2 Teste de imersão rápida	29
4.3 Teste de resposta a um degrau de corrente	31
4.4 Comparação entre os resultados do modelo mate_ mático proposto	33
5. EXPERIÊNCIA	35
5.1 Objetivo	35
5.2 Arranjo experimental	35
5.3 Detalhes e informações do RTD utilizado	38
5.4 Circuito eletrônico	41
5.5 Teste de imersão rápida: procedimento experi_ mental	44
5.6 Teste de resposta a um degrau de corrente : pro_ cedimento experimental	46

	Pag.
5.7 Problemas observados no trabalho experimental ..	49
6. RESULTADOS	52
6.1 Análise dos resultados	52
6.2 Validação do método	59
7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	67
7.1 Conclusões	67
7.2 Recomendações	68
Apêndice I Dependência do tempo de resposta com as con- dições locais	71
Apêndice II Obtenção de parâmetros com o programa SAS	75
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

A segurança de uma usina nuclear depende, entre outros fatores, da monitoração contínua de certas variáveis consideradas críticas, como por exemplo temperatura nas pernas quente e fria do primário, pressão no pressurizador, nível de água no pressurizador e no gerador de vapor, fluxo de neutrons e outras. Do ponto de vista de segurança da planta é desejável que a indicação destas variáveis seja instantânea, mas na realidade isto não ocorre, pois existe um intervalo de tempo entre o início de um transiente e o registro do mesmo pela instrumentação de processo. Este intervalo de tempo é chamado atraso ou tempo de resposta do sistema.

Com a publicação do "Nuclear Regulatory Guide 1.118", em 1977³ (12) a "U.S. Nuclear Regulatory Commission (USNRC)" forneceu um novo enfoque para determinação do tempo de resposta de sensores instalados em centrais nucleares. No NUREG 1.118 a USNRC recomenda que sejam feitos testes periódicos a fim de se verificar se o tempo de resposta dos canais de segurança dos reatores está ou não dentro dos limites estabelecidos na análise de segurança. Recomenda também que o tempo de resposta seja medido "in-situ", ou seja, com o sensor instalado em seu local de operação normal. Se isto não for possível, e se a medida for feita em laboratório, as condições ambientes devem ser reproduzidas o mais fielmente possível.

Este trabalho visa o estudo de um método utilizado para determinação do tempo de resposta de sensores de temperatura do tipo RTD (resistance temperature detector), usados em canais de segurança de centrais nucleares.

Um dos problemas nas medidas de tempo de resposta de sensores de temperatura, é que o tempo medido depende, além das características do sensor, das condições locais onde o mesmo está instalado (vide Apêndice I). Isto significa que o tempo de resposta de um sensor medido em laboratório, não representa necessariamente o tempo de resposta do mesmo sensor quando instalado no sistema, pois as condições locais de pressão, temperatura e principalmente vazão, são dificilmente reproduzíveis em laboratório. Adicionalmente, no caso de usinas nucleares, é importante que o teste possa ser realizado de um ponto remoto, pois não é possível o acesso ao sensor quando o reator está em funcionamento, visto que o sensor fica localizado dentro do sistema de contenção.

CAPÍTULO 2

2. HISTÓRICO

O "Nuclear Regulatory Guide 1.118" adicionou uma nova di men são a medidas de tempo de resposta de sensores, quando recomen dou que as empresas que operam centrais nucleares façam medi das de tempo de resposta para sensores instalados nos sistemas de segurança da usina. Estes novos requisitos para qualificar sensores instalados em sistemas de segurança de centrais nucle ares estimularam o desenvolvimento de métodos para determinar o tempo de resposta de RTD's quando instalados no processo.

Os métodos utilizados para se determinar o tempo de resposta de RTD's podem se dividir em dois tipos. O primeiro consiste em uma perturbação na temperatura do fluido externo ao RTD,¹ e o segundo consiste numa perturbação interna ao RTD, através do aquecimento ôhmico do elemento sensor.

Métodos relativos à perturbação na temperatura do fluido envolvem:

1. análise de flutuações na saída do sensor durante operação normal (análise de ruído);
2. análise de flutuações de temperatura induzidas.

Na análise de ruído pode-se usar diferentes técnicas:

- a. "time - series analysis"

- b. análise no domínio da frequência
- c. análise de função correlação.

A técnica de análise de ruído foi utilizada por Upadhyaya e Kerlin^(15,16) na estimativa das características do tempo de resposta de RTD's usados em reatores tipo PWR. Modelos de auto-regressão foram ajustados aos dados obtidos do sensor, e foram calculadas as respostas do sensor para mudanças na temperatura do fluido em forma de impulso, degrau e rampa. Algoritmos numéricos simples e eficientes foram usados para estimar a constante de tempo do sensor e o tempo de atraso da rampa. O problema deste método é que ele supõe ruído branco ("white noise") como fonte de perturbação, o que nem sempre é verdade.

Na análise de flutuações induzidas de temperatura pode-se recorrer aos seguintes procedimentos:

- a. usando movimento de barras de controle para causar mudanças de potência e concomitantemente mudanças de temperatura;
- b. usando perturbações na válvula de vapor ou válvula de alimentação de água para induzir mudança de temperatura no fluido primário;
- c. usando esquemas locais especiais, localizados perto do sensor, tais como injeção de fluidos por pequenos orificios ou pequenos elementos de aquecimento elétrico.

Os métodos relativos à perturbação interna incluem a análise de:

- 1. um transiente na saída do sensor induzido por uma corrente acima da normal, a qual causa geração de calor

.6.

Os métodos de induzir variação de temperatura no fluido apresentam aspectos desfavoráveis porque:

- a. transientes induzidos pelas barras de controle, válvulas de vapor ou válvulas de alimentação de água envolvem testes complexos que seriam provavelmente desnecessários para a medida de resposta do sensor. Contudo estes métodos podem ser úteis para medir atrasos devidos a "bypass" de linhas, usadas em algumas instalações de sensores;
- b. equipamento especial na tubulação poderia envolver uma modificação de alto custo na usina. Ademais, testes feitos removendo-se o sensor estão fora de questão, pois estes métodos ignoram os importantes efeitos do meio ambiente na tubulação onde a medida será feita.

CAPÍTULO 3

3. RESUMO TEÓRICO

3.1 RTD - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO E CARACTERÍSTICAS GERAIS.

O RTD (Resistance Temperature Detector) é um dos tipos de sensores de temperatura usados em centrais nucleares. Seu princípio de funcionamento é baseado no fato de que a resistividade elétrica de certos materiais varia com a temperatura de forma reprodutível.

As características do material empregado para resistência incluem:

1. alto coeficiente de temperatura de resistividade (α): quanto maior a variação de resistividade por grau de temperatura para um dado valor de resistência, maior a sensibilidade do sensor.
2. alta resistividade: quanto maior a resistividade do material, maior a resistência que é possível de se obter para um dado comprimento de fio e, conseqüentemente, para um dado espaço. Adicionalmente, quanto maior a resistência para uma dada temperatura, maior é a mudança por grau de temperatura. Este fator contribui para a sensibilidade.
3. Estabilidade: o material deve ser estável por um longo

período de tempo.

4. Relação linear entre resistividade e temperatura: esta característica é desejável, desde que resulta em uma escala linear de temperatura e simplifica grandemente o ajuste da resistência.
5. Ductilidade e força (resistência mecânica): o material deve ser facilmente construído em fios de diâmetro pequeno e ao mesmo tempo possuir resistência a esforços mecânicos.

Os materiais mais utilizados para resistência são: platina, níquel e cobre. Curvas típicas para estes materiais são mostradas na figura 1.

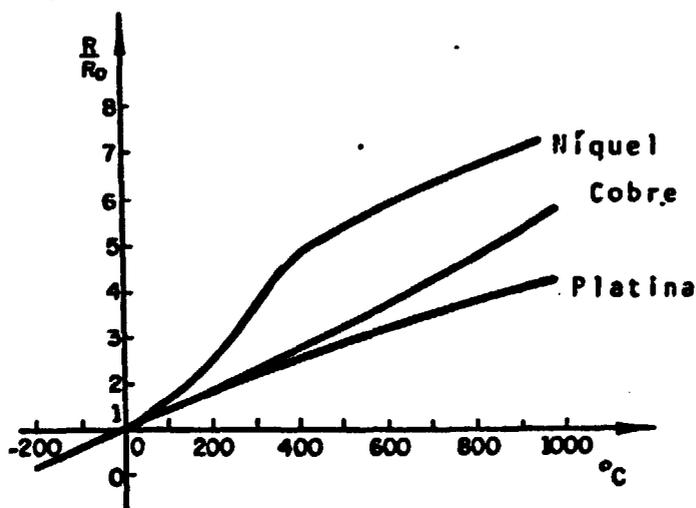


Figura 1 : Curvas de resistência relativa em função da temperatura para a platina, níquel e cobre⁽¹⁾.

A platina pura tem uma relação entre a resistividade e a temperatura praticamente linear. A relação é especialmente estável e reproduzível. Por esta razão, o termômetro de resistência de platina, modelo de laboratório, é o padrão para medições de temperaturas na faixa de -190°C a 660°C ⁽²⁾. Na versão in

dustrial, é um sensor de inigualável precisão, sensibilidade e estabilidade.

O níquel tem sido amplamente usado como elemento sensor de RTD's para temperaturas dentro de um intervalo de aproximadamente -100 a $+300^{\circ}\text{C}$, principalmente devido ao seu baixo custo e alto valor do seu coeficiente de temperatura. Acima de 300°C , a relação entre temperatura e resistividade para o níquel muda de caráter. O níquel é muito suscetível à contaminação, e a relação entre resistividade e temperatura não é tão bem conhecida ou reproduzível como para a platina.

O cobre é barato e sua relação entre resistividade e temperatura é linear dentro de um intervalo de temperatura relativamente largo. O cobre tem baixa resistência à oxidação acima de temperaturas moderadas e tem muito menor estabilidade e reprodutibilidade do que a platina. A baixa resistividade do cobre é uma desvantagem quando um elemento de alta resistência é desejado.

Para materiais puros, a variação da resistividade com a temperatura é praticamente linear sobre um largo intervalo de temperatura. Para estes materiais a relação entre resistência e temperatura pode ser expressa como:

$$R(t) = R_0 (1 + \alpha t) \quad (1)$$

onde: $R(t)$: resistência à temperatura t

R_0 : resistência a 0°C (ou alguma outra temperatura de referência)

α : coeficiente de temperatura de resistência.

Na forma diferencial, a relação é:

$$\alpha = \frac{1}{R_0} \frac{dR}{dt} \quad (2)$$

A relação entre resistência e temperatura pode ser expressa com mais precisão, acrescentando-se termos de 2º e 3º grau à equação (1):

$$R(t) = R_0 (1 + \alpha t + b t^2 + c t^3) \quad (3)$$

onde os coeficientes α , b e c são determinados a partir de medidas de resistência em três ou mais temperaturas espaçadas sobre um intervalo de temperatura de trabalho.

Para a platina, a relação entre resistência e temperatura é dada pela equação de Callendar-Van Dusen⁽²⁾:

$$\frac{R(t)}{R_0} = 1 + \alpha \left[t - \delta \left(\frac{t}{100} \right) \left(\frac{t}{100} - 1 \right) - \beta \left(\frac{t}{100} \right)^3 \left(\frac{t}{100} - 1 \right) \right] \quad (4)$$

onde:

α : é o coeficiente de temperatura de resistência

δ : é obtido pela calibração a alta temperatura, como por exemplo a temperatura de congelamento do zinco

β : é obtido pela calibração a uma temperatura negativa, como por exemplo a temperatura de ebulição do oxigênio.

Os valores das constantes α , δ , β podem variar de acordo com o fabricante do elemento sensor. A tabela 1 fornece os valores destas constantes para alguns tipos de sensores:

TABELA 1

Valor das constantes α , δ e β para três tipos de sensores⁽¹⁴⁾

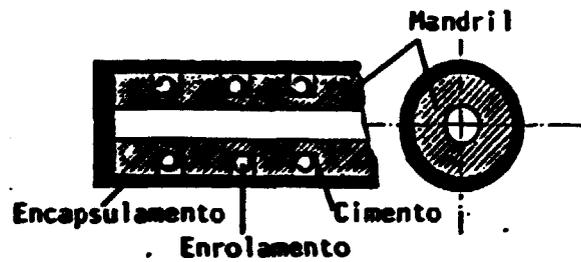
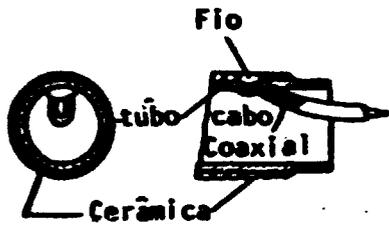
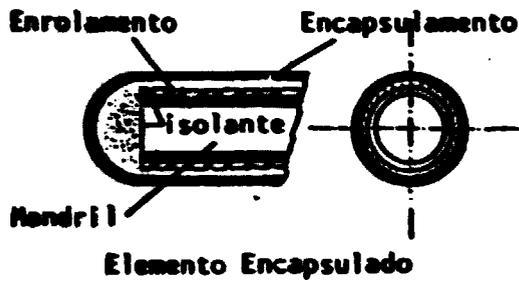
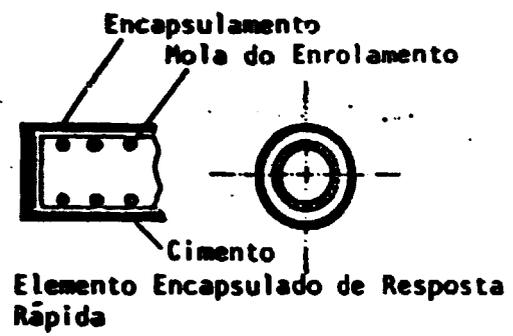
Tipo de sensor	PT 100	D100	F130
α	$3,850 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$3,916 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$3,900 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
δ	$1,50700^\circ\text{C}$	$1,50594^\circ\text{C}$	$1,49500^\circ\text{C}$
β	$0,111^\circ\text{C}$	$0,116^\circ\text{C}$	$0,113^\circ\text{C}$

O valor de R_0 é fixado ajustando-se o diâmetro e o comprimento do fio. Tipicamente os sensores têm resistência de 100Ω ou 200Ω a 0°C . O desvio no valor de R_0 é um resultado direto do método de fabricação, e uma tolerância de $\pm 0,01\%$ é facilmente executável⁽¹⁴⁾.

Os elementos sensores dos termômetros resistivos podem ser construídos em uma variedade de formas. A escolha da estrutura depende de fatores como: 1) compatibilidade do material da resistência com o meio ambiente, 2) requisitos para rapidez de resposta, 3) extensão imersa requerida e 4) esforços mecânicos esperados.

A figura 2 mostra 6 tipos de montagem do elemento sensor⁽⁵⁾.

A figura 3 mostra um RTD típico em um poço termométrico.



Elemento Revestido de Cerâmica

Elemento Encapsulado Resistente

Figura 2: Estruturas Típicas Usadas em RTD's.

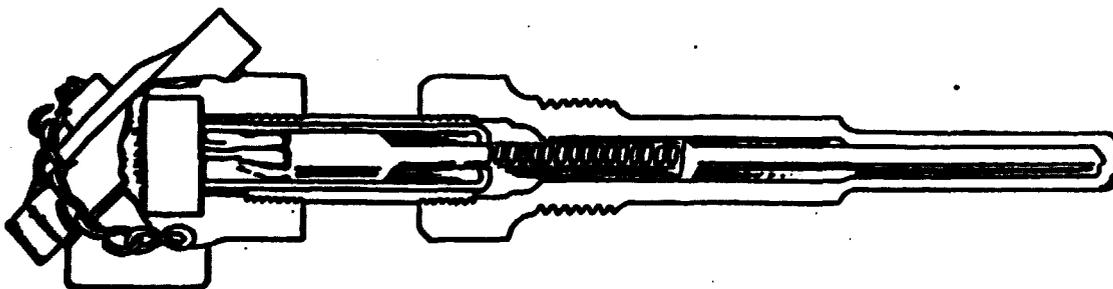


Figura 3: RTD em um Poço Termométrico.

O elemento sensor é colocado na ponta da haste metálica. Ele deve estar sempre em ótimo contato térmico com a superfície interna da haste, tal que possa ocorrer uma transferência de calor apropriada entre o meio e o sensor, resultando numa velocidade de resposta aceitável. Os fios da resistência devem estar eletricamente isolados da haste. Assim sendo, nota-se que um dos problemas fundamentais no projeto e construção de RTD's é alcançar a isolação elétrica desejada com a mínima isolação térmica.

Modo de instalação

Existem dois modos de instalação de sensores de temperatura do tipo RTD. Os sensores podem ser instalados diretamente no processo, sendo rosqueados ou soldados em derivações conforme esquematizado na figura 4. Este tipo de instalação permite isolar a derivação quando for necessário retirar o RTD.

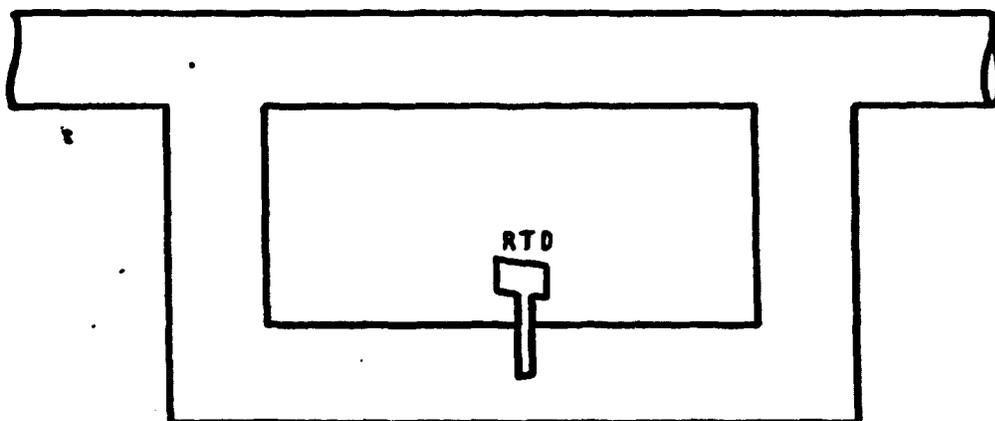


Figura 4: Instalação do RTD diretamente no processo.

Quando o RTD está sujeito a altas pressões resultantes do fluxo de líquidos ou gases, utilizam-se tubos de proteção, chamados poços termométricos. Os poços termométricos são feitos geralmente de aço inoxidável, podem ser rosqueados ou

flangeados, e são instalados na linha de processo, como mostra do na figura 5.

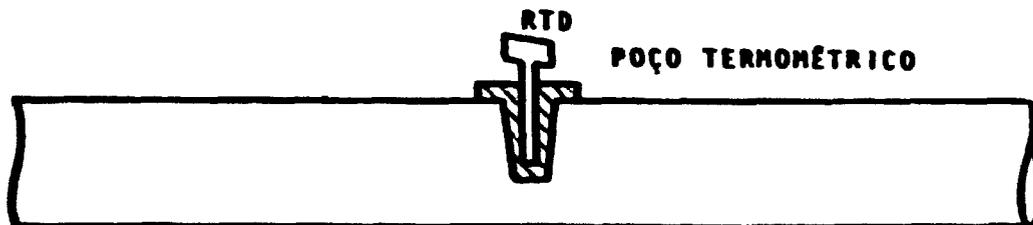


Figura 5: Instalação do RTD usando poço termométrico.

O tempo de resposta para sensores em poços termométricos pode ser melhorado usando um material aglutinante térmico para preencher o pequeno espaço de ar (gap) entre o sensor e o poço termométrico.

3.2 MEDIDA DE RESISTÊNCIA

A medida da resistência do RTD pode ser feita com qualquer circuito em ponte. A ponte de Wheatstone normalmente é usada para comparação e medida de resistências no intervalo de 1 Ω (ohm) a 1M Ω (Megohm).

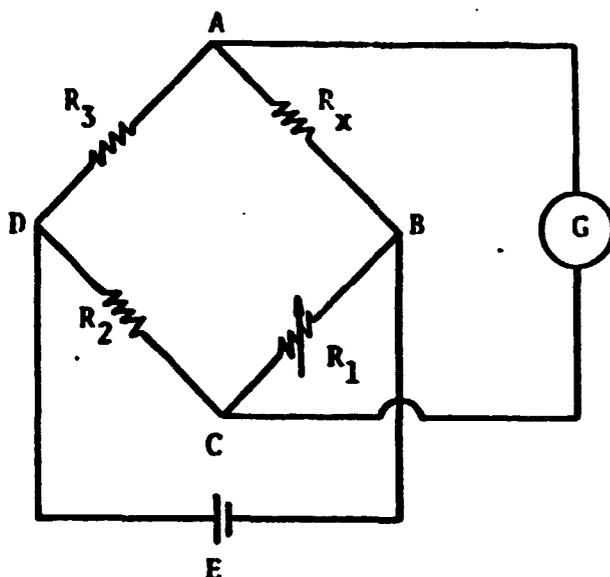


Figura 6: Ponte de Wheatstone.

A ponte de Wheatstone, cujo esquema é mostrado na figura 6, é composta por quatro resistências: R_1 , R_2 , R_3 e R_x . R_1 é uma resistência variável conhecida, enquanto que R_x é uma resistência desconhecida. Uma voltagem E é aplicada à ponte, e ajustando a resistência variável R_1 , a ponte pode ser balanceada tal que o potencial em A seja igual ao potencial em C . Esta condição de balanço pode ser medida pelo galvanômetro G .

Neste esquema, a resistência desconhecida é o RTD, e como se deseja estudar a variação da resistência do RTD em função do tempo, o galvanômetro é substituído por um medidor de tensão. Quando a ponte estiver em equilíbrio, o medidor de tensão registrará zero volts, e a variação da resistência do RTD durante um transiente será registrada como uma variação da tensão de saída da ponte, conforme esquematizado na figura 7.

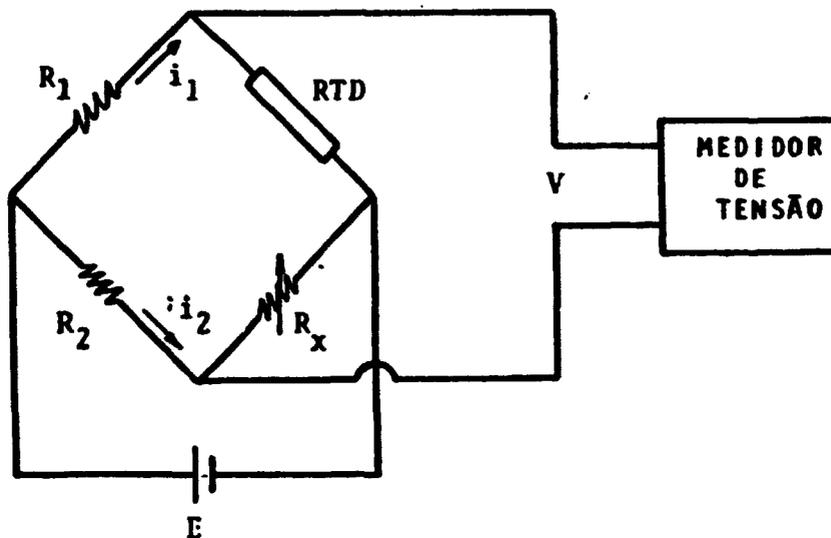


Figura 7: Circuito em ponte de Wheatstone para medir a variação da resistência do RTD.

Pode-se mostrar que a relação entre tensão medida e resistência do RTD pode ser assumida como linear.

Aplicando-se as equações de correntes e tensões no circuito da figura 7, tem-se que:

$$i_1 = \frac{E}{R_1 + R_{RTD}} \quad (5)$$

$$i_2 = \frac{E}{R_2 + R_x} \quad (6)$$

$$V = i_1 R_1 - i_2 R_2 \quad (7)$$

$$V = i_2 R_x - i_1 R_{RTD} \quad (8)$$

Substituindo (5) e (6) em (8), tem-se:

$$V = \frac{E}{R_2 + R_x} R_x - \frac{E}{R_1 + R_{RTD}} R_{RTD} \quad (9)$$

ou

$$V = E \left(\frac{R_x}{R_2 + R_x} - \frac{R_{RTD}}{R_1 + R_{RTD}} \right) \quad (10)$$

Expandindo o termo R_{RTD} em $R_0 + \Delta R$, onde R_0 é um valor constante e ΔR é a variação da resistência do RTD, e substituindo em (10), obtêm-se:

$$V = E \left(\frac{R_x}{R_2 + R_x} - \frac{R_0 + \Delta R}{R_1 + R_0 + \Delta R} \right) \quad (11)$$

Como ΔR é um valor pequeno em comparação a R_0 ($\Delta R = 0,392719\Omega$ (ohms) para uma variação na temperatura de 1°C e $R_0 = 100\Omega$ (ohms)⁽¹⁰⁾), pode-se aproximar a equação (11) para :

$$V = E \left(\frac{R_x}{R_2 + R_x} - \frac{R_0 + \Delta R}{R_1 + R_0} \right) \quad (12)$$

e portanto, a tensão medida V é aproximadamente diretamente proporcional à variação da resistência do RTD, ΔR .

3.3 CONSTANTE DE TEMPO

Para sistemas lineares de 1ª ordem, a constante de tempo é definida como o tempo necessário para que a resposta do sistema atinja 63,2% de seu valor final quando o mesmo sofre uma variação em forma de degrau na entrada (figura 8).

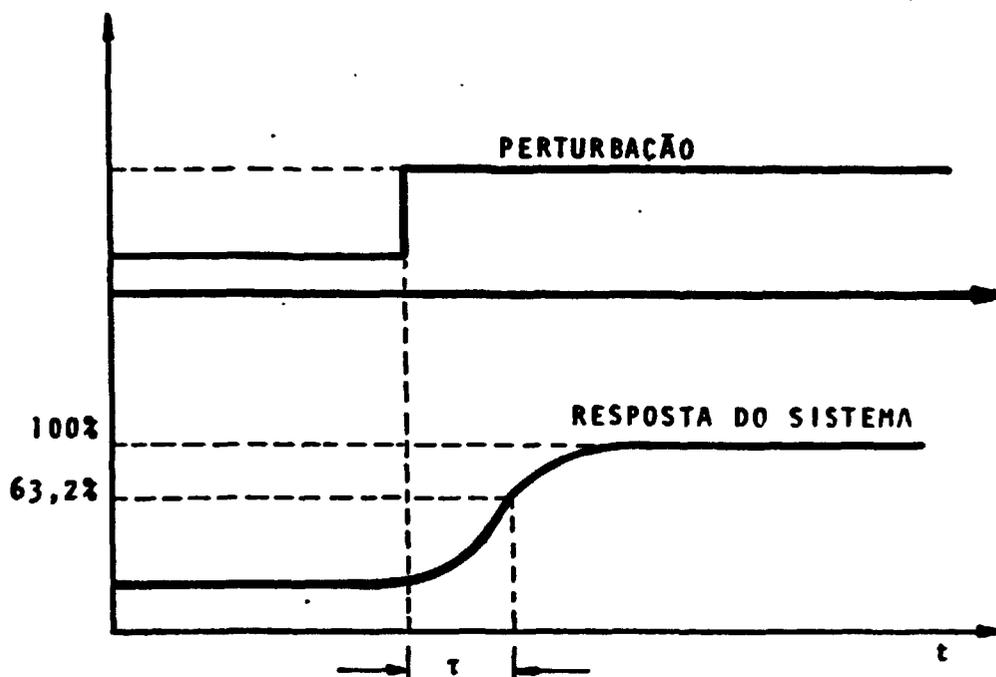


Figura 8: Definição da constante de tempo τ .

Embora a constante de tempo seja definida apenas para sistemas lineares e de 1^o ordem, ela também é aceita como característica dinâmica de sistemas de ordens superiores.

O método mais direto para medir a constante de tempo de um sensor de temperatura consiste em se aplicar um degrau de temperatura no fluido onde está instalado o sensor e verificar a resposta do mesmo.

Na prática, porém, existem dificuldades em se aplicar uma perturbação na temperatura do fluido em forma de de

grau. Um teste de laboratório que simula esta condição é o chamado teste de imersão rápida ou "Plunge Test".

3.4 TESTE DE IMERSÃO RÁPIDA

O teste de imersão rápida é um teste feito em laboratório que simula uma variação em degrau na temperatura do fluido onde está imerso o sensor de temperatura.

O teste consiste simplesmente em fazer a imersão rápida do sensor num fluido mantido a uma temperatura constante e monitorar sua saída até que ele atinja a temperatura de estado estacionário. Assim, o sensor passa rapidamente de uma temperatura ambiente T_a , para a temperatura do fluido T_f , ou seja, ele sofre a ação de um degrau de temperatura. O esquema do teste de imersão rápida é mostrado na figura 9.

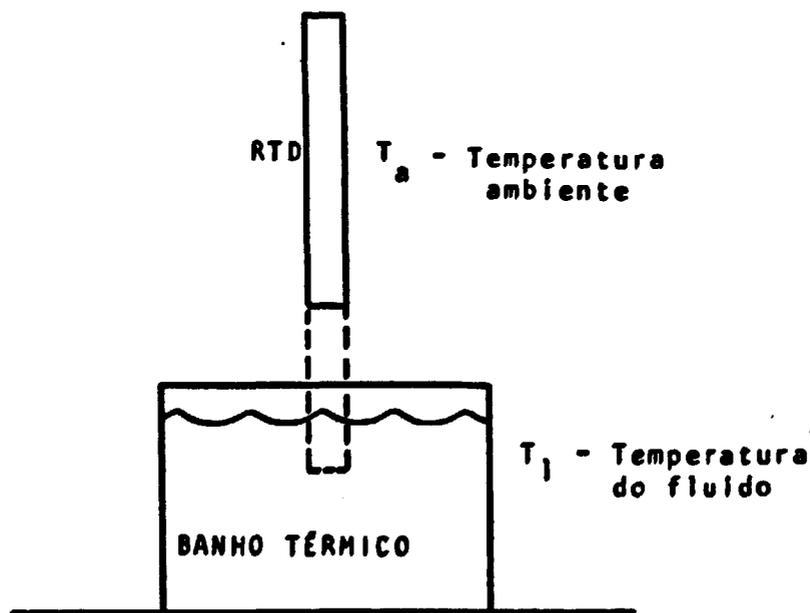


Figura 9: Esquema do teste de imersão rápida.

Como o teste de imersão rápida é um teste feito em laboratório, ele não reproduz com precisão as condições de transferência de calor que ocorrem em condições normais de operação do sensor, principalmente o coeficiente de transferência de calor entre o sensor e o fluido. Este parâmetro não pode ser conhecido com precisão devido a variações nos sensores resultante dos próprios fabricantes, e também devido às incertezas das correlações de transferência de calor.

Portanto, é necessário o estudo de um teste que possa ser feito com o sensor colocado em seu lugar de operação, ou seja, um teste "in situ".

3.5 TESTE DE RESPOSTA A UM DEGRAU DE CORRENTE

Como o sensor de temperatura do tipo RTD consiste apenas em um resistor cuja resistência varia com a temperatura, a passagem de corrente elétrica através de seus terminais faz com que ocorra geração de calor (por efeito Joule) dentro do sensor. Este calor, por sua vez, é transferido através da estrutura do sensor para o fluido no qual ele está imerso, mantendo um equilíbrio térmico.

Normalmente, usa-se uma corrente baixa nos RTD's a fim de minimizar a imprecisão da medida. Como o controle da corrente que passa no RTD é possível de ser efetuado de um local remoto, aumentando-se a corrente elétrica que passa através de seus terminais, aumentará a geração de calor dentro do sensor e conseqüentemente aumentará sua temperatura interna.

Assim, nota-se que existe um método que permite causar um transiente na temperatura interna do sensor. Este método

do é chamado teste de resposta a um degrau de corrente ou "loop current step response" LCSR.

O procedimento do teste consiste em aumentar bruscamente a corrente elétrica que passa através do RTD, a qual causa um aumento na temperatura interna do sensor. Esta variação de temperatura causa variação na resistência do RTD e é registrada como uma variação de tensão. Esta é monitorada até que o sensor atinja novamente o estado de equilíbrio de transferência de calor para o fluido. Portanto, o teste de resposta a um degrau de corrente fornece uma resposta a uma variação interna da temperatura do sensor.

Entretanto, desde que a resposta de interesse é aquela causada por uma mudança na temperatura do fluido de fora do sensor, é necessário transformar os resultados do teste de resposta a um degrau de corrente numa resposta equivalente a uma mudança na temperatura do fluido.

3.6 RELAÇÃO ENTRE TESTE DE IMERSÃO RÁPIDA E TESTE DE RESPOSTA A UM DEGRAU DE CORRENTE

O que se deseja conhecer na realidade, é o tempo de resposta do sensor RTD quando a temperatura do fluido no qual o sensor está imerso sofre uma variação em forma de degrau.

O teste de imersão rápida simula a variação em forma de degrau na temperatura do fluido, porém ele não simula as condições reais de operação do sensor. Por outro lado, o teste de resposta a um degrau de corrente, embora considere todas as condições locais de operação, pois é um teste "in situ", causa uma variação da temperatura interna do sensor, e não uma variação

ção na temperatura do fluido.

Em termos de transferência de calor, pode-se dizer que no teste de imersão rápida, o calor é transferido do fluido para a resistência que existe no interior do sensor, e no teste de resposta a um degrau de corrente, o calor é transferido da resistência para o fluido.

CAPÍTULO 4

4. MODELO MATEMÁTICO PARA TESTE DE IMERSÃO RÁPIDA E TESTE DE RESPOSTA A UM DEGRAU DE CORRENTE

4.1 MODELO DINÂMICO PROPOSTO

O modelo dinâmico proposto para o RTD consiste em uma malha de nós na qual as temperaturas são avaliadas nos pontos de nós e as resistências de transferência de calor são avaliadas entre dois nós consecutivos. O modelo utilizado é unidimensional.

A malha de nós é esquematizada na figura 10.



onde: T_1 : temperatura do nó 1

T_F : temperatura do fluido

R_i : resistência de transferência de calor entre os nós i e $i-1$.

Figura 10: Malha unidimensional de nós.

As equações do modelo dinâmico podem então ser geradas a partir do balanço de energia aplicado a um nó genérico i (figura 11).

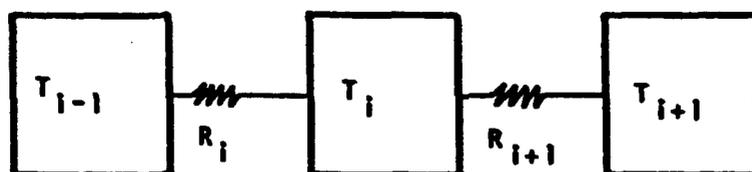


Figura 11: Parte genérica da malha.

Balço de energia:

Varição de energia interna em i = Calor conduzido + Calor gerado em i

$$m_i c_{pi} \frac{\partial T_i}{\partial t} = q_i + C_i \quad (13)$$

De acordo com a lei de Fourier de condução de calor:

$$q = -k A \frac{\partial T}{\partial r} \quad (14)$$

ou

$$\partial r = \frac{-kA}{q} \partial T. \quad (15)$$

Integrando a equação (15) entre os nós $i-1$ e i

$$\int_{r_{i-1}}^{r_i} \partial r = \frac{-kA}{q} \int_{T_{i-1}}^{T_i} \partial T \quad (16)$$

$$r_i - r_{i-1} = \frac{-kA}{q} (T_i - T_{i-1}) \quad (17)$$

e portanto, a equação que descreve a condução de calor entre

os nós $i-1$ e i é:

$$q_{i-1 \rightarrow i} = \frac{kA}{r_i - r_{i-1}} (T_{i-1} - T_i) \quad (18)$$

Como a resistência de transferência de calor R é definida por:

$$R = \frac{L}{kA} \quad (19)$$

então

$$q_{i-1 \rightarrow i} = \frac{1}{R_i} (T_{i-1} - T_i) \quad (20)$$

Analogamente, para a condução de calor entre os nós i e $i+1$ tem-se:

$$q_{i \rightarrow i+1} = \frac{1}{R_{i+1}} (T_i - T_{i+1}) \quad (21)$$

Combinando as equações (20) e (21), tem-se que o calor conduzido em i é dado por:

$$q_i = \frac{1}{R_i} (T_{i-1} - T_i) - \frac{1}{R_{i+1}} (T_i - T_{i+1}) \quad (22)$$

Substituindo o valor de q_i na equação (13) tem-se:

$$m_i c_{pi} \frac{dT_i}{dt} = \frac{1}{R_i} (T_{i-1} - T_i) - \frac{1}{R_{i+1}} (T_i - T_{i+1}) + C_i \quad (23)$$

ou

$$\frac{dT_i}{dt} = a_{i,i-1} T_{i-1} - a_{i,i} T_i + a_{i,i+1} T_{i+1} + Q_i \quad (24)$$

onde:

$$a_{i,i-1} = \frac{l}{m_i c_{pi} R_i} \quad a_{i,i} = \frac{l}{m_i c_{pi}} \left(\frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_{i+1}} \right)$$

$$a_{i,i+1} = \frac{l}{m_i c_{pi} R_{i+1}} \quad Q_i = \frac{c_i}{m_i c_{pi}}$$

As equações de nós podem ser aplicadas a uma série de nós, começando com o nó mais próximo ao centro, $i=1$, e terminando com o nó mais próximo à superfície externa do sensor, $i=N$. As equações têm a seguinte forma:

$$\begin{aligned} \frac{dT_1}{dt} &= -a_{11} T_1 + a_{12} T_2 + Q_1 \\ \frac{dT_2}{dt} &= a_{21} T_1 - a_{22} T_2 + a_{23} T_3 + Q_2 \\ &\vdots \\ &\vdots \\ &\vdots \\ \frac{dT_N}{dt} &= a_{N,N-1} T_{N-1} - a_{N,N} T_N + a_{NF} T_F + Q_N \end{aligned} \quad (25)$$

Este sistema pode ser escrito na forma matricial:

$$\frac{d\bar{X}}{dt} = \bar{A} \bar{X} + \bar{F} \quad (26)$$

onde:

$$\bar{X} = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ T_N \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} -a_{11} & a_{12} & 0 & 0 & \dots \\ a_{21} & -a_{22} & a_{23} & 0 & \dots \\ 0 & a_{32} & -a_{33} & a_{34} & \dots \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & -a_{N,N} \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$\bar{F} = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ a_{NF} T_F + Q_N \end{bmatrix} \quad (29)$$

Para se estudar melhor o comportamento dinâmico do sensor de temperatura, considera-se apenas a variação das temperaturas de cada nó em relação à temperatura inicial, ou seja, separa-se as temperaturas em duas componentes: uma componente constante (antes do transiente) e uma componente variável

vel (após o início do transiente). Desta forma, tem-se:

$$\bar{X} = \bar{X}(t) + \bar{X}_0 \quad (30)$$

$$\bar{F} = \bar{F}(t) + \bar{F}_0 \quad (31)$$

onde \bar{X}_0 e \bar{F}_0 são as componentes constantes

$\bar{X}(t)$ e $\bar{F}(t)$ são as componentes variáveis.

Substituindo (30) e (31) em (26) tem-se:

$$\frac{d}{dt} [\bar{X}(t) + \bar{X}_0] = \bar{A} [\bar{X}(t) + \bar{X}_0] + \bar{F}(t) + \bar{F}_0 \quad (32)$$

ou

$$\frac{d\bar{X}(t)}{dt} + \frac{d\bar{X}_0}{dt} = \bar{A} \bar{X}(t) + \bar{F}(t) + \bar{A} \bar{X}_0 + \bar{F}_0, \quad (33)$$

$$\text{como: } \frac{d\bar{X}_0}{dt} = 0 \quad (34)$$

$$\text{e } \bar{A} \bar{X}_0 + \bar{F}_0 = 0 \quad (35)$$

a equação (33) fica somente em termos de variação de temperatura:

$$\frac{d\bar{X}(t)}{dt} = \bar{A} \bar{X}(t) + \bar{F}(t). \quad (36)$$

A equação (36) é semelhante à equação (26).

Aplicando transformada de Laplace à equação (36) tem

se:

$$[s \bar{T} - \bar{A}] \bar{X}(s) = \bar{F}(s) \quad (37)$$

Considerando que o filamento do elemento sensor do RTD está localizado no nó mais central, o sistema deve ser resolvido para T_1 , e a solução pode ser encontrada pela regra de Cramer:

$$T_1(s) = \frac{B(s)}{|s \bar{T} - \bar{A}|} \quad (38)$$

onde $B(s)$ é o determinante da matriz $|s \bar{T} - \bar{A}|$ com sua primeira coluna substituída por $\bar{F}(s)$.

4.2 TESTE DE IMERSÃO RÁPIDA

No caso em que há uma perturbação na temperatura do fluido, não há geração de calor em nenhum nó, e o vetor $\bar{F}(s)$ possui apenas o último elemento não nulo. Neste caso o determinante $B(s)$ é:

$$B(s) = \begin{vmatrix} 0 & -a_{12} & 0 & 0 & \dots \\ 0 & (s+a_{22}) & -a_{23} & 0 & \dots \\ \cdot & -a_{32} & (s+a_{33}) & -a_{34} & \dots \\ \cdot & \cdot & -a_{43} & (s+a_{44}) & \dots \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ a_{NF} T_F(s) & & & & \end{vmatrix} \quad (39)$$

ou

$$B(s) = a_{NF} T_F(s) (-1)^{(N+F)} \begin{vmatrix} -a_{12} & 0 & 0 & \dots \\ (s+a_{22}) & -a_{23} & 0 & \dots \\ -a_{32} & (s+a_{33}) & -a_{33} & \dots \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{vmatrix} \quad (40)$$

O determinante (40) é da forma de uma matriz triangular inferior (todos os elementos acima da diagonal principal são nulos). O determinante é dado pelo produto dos elementos da diagonal principal, os quais são todos constantes. Portanto, para uma perturbação na temperatura do fluido, tem-se:

$$T_1(s) = \frac{T_F(s) a_0}{|s\bar{T} - \bar{A}|} \quad (41)$$

Para uma mudança na temperatura do fluido em forma de degrau, ($T_F(s) = \frac{1}{s}$) $T_1(s)$ é dado por:

$$T_1(s) = \frac{a_0}{s |s\bar{T} - \bar{A}|} \quad (42)$$

ou

$$T_1(s) = \frac{a_0}{s(s-p_1)(s-p_2)\dots(s-p_N)} \quad (43)$$

onde

p_i são os autovalores da matriz \bar{A} .

Usando o teorema dos resíduos para obter $T_1(t)$:

$$T_1(t) = a_0 \left[\frac{1}{(-p_1)(-p_2) \dots (-p_N)} + \frac{e^{p_1 t}}{p_1(p_1 - p_2) \dots (p_1 - p_N)} + \right. \\ \left. + \frac{e^{p_2 t}}{p_2(p_2 - p_1) \dots (p_2 - p_N)} + \dots \right] \quad (44)$$

4.3 TESTE DE RESPOSTA A UM DEGRAU DE CORRENTE

Para o caso de teste de resposta a um degrau de corrente, como sã hã geração de calor no nã 1, ou seja, no filamento do elemento sensor, e a temperatura do fluido permanece constante, apenas o primeiro elemento do vetor $\bar{F}(s)$ é diferente de zero, e $B(s)$ é dado por:

$$B(s) = \begin{vmatrix} Q_1(s) & -a_{12} & 0 & 0 & \dots \\ 0 & (s + a_{22}) & -a_{23} & 0 & \dots \\ 0 & -a_{32} & (s + a_{33}) & -a_{34} & \dots \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{vmatrix} \quad (45)$$

ou

$$B(s) = Q_1(s) \begin{vmatrix} (s + a_{22}) & -a_{23} & 0 & \dots \\ -a_{32} & (s + a_{33}) & -a_{34} & \dots \\ 0 & -a_{43} & (s + a_{44}) & \dots \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{vmatrix} \quad (46)$$

O determinante (46) resulta num polinômio de ordem $M = N - 1$, e que pode ser escrito como:

$$B(s) = Q_1(s) \left[K (s - z_1)(s - z_2) \dots (s - z_M) \right] \quad (47)$$

onde z_j são os zeros do polinômio e K é uma constante.

Assim sendo:

$$T_1(s) = \frac{Q_1(s) K (s - z_1)(s - z_2) \dots (s - z_M)}{|s \bar{T} - \bar{A}|} \quad (48)$$

ou seja:

$$T_1(s) = \frac{Q_1(s) K (s - z_1)(s - z_2) \dots (s - z_M)}{(s - p_1)(s - p_2) \dots (s - p_N)} \quad (49)$$

onde novamente p_i são os autovalores da matriz \bar{A} .

Para uma variação em forma de degrau unitário em $Q_1(s)$ ($Q_1(s) = \frac{1}{s}$), obtém-se:

$$T_1(s) = \frac{K(s - z_1)(s - z_2) \dots (s - z_M)}{s(s - p_1)(s - p_2) \dots (s - p_N)} \quad (50)$$

A solução para $T_1(t)$ é obtida novamente usando o teorema dos resíduos:

$$T_1(t) = K \left[\frac{(-z_1)(-z_2) \dots (-z_M)}{(-p_1)(-p_2) \dots (-p_N)} + \right. \\ \left. + \frac{(p_1 - z_1)(p_1 - z_2) \dots (p_1 - z_M)}{p_1(p_1 - p_2) \dots (p_1 - p_N)} e^{p_1 t} + \dots \right] \\ \left. + \frac{(p_2 - z_1)(p_2 - z_2) \dots (p_2 - z_M)}{p_2(p_2 - p_1) \dots (p_2 - p_N)} e^{p_2 t} + \dots \right] \quad (51)$$

4.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DO MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO

Analisando as equações (44) e (51) para os casos do teste de resposta a um degrau de corrente e teste de imersão rápida, verifica-se que os termos exponenciais são os mesmos em ambos os resultados. Isto era esperado, desde que estes dependem apenas das resistências de transferência de calor e capacidades caloríficas, que são as mesmas nos dois casos, desde que ambos os testes sejam feitos nas mesmas condições de temperatura e vazão. Portanto, os resultados mostrados, os quais se aplicam somente a casos predominantemente unidimensionais, podem ser usados para se fazer um procedimento analítico que con

verta os resultados do teste de resposta a um degrau de corrente para resultados equivalentes de mudança na temperatura do fluido. O procedimento consiste em:

1. fazer um teste de resposta a um degrau de corrente
2. determinar tantos polos (p_i) quantos possíveis, ajustando a seguinte equação aos dados:

$$T(t) = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} + \dots$$

3. usar os p_i para prever a resposta do sensor quando submetido a uma perturbação em forma de degrau na temperatura do fluido.

CAPÍTULO 5

5. EXPERIÊNCIA

5.1 OBJETIVO

O objetivo da experiência é a validação do método de resposta a um degrau de corrente, para obtenção da constante de tempo de sensores de temperatura do tipo RTD. Para tanto, foi montado um arranjo experimental onde podem ser realizados os testes de resposta a um degrau de corrente e de imersão rápida.

O resultado do teste de resposta a um degrau de corrente é utilizado para prever a resposta do sensor quando submetido a uma perturbação em forma de degrau na temperatura do fluido onde está imerso. O resultado final é então comparado com o resultado de um teste de imersão rápida, para validação do método.

5.2 ARRANJO EXPERIMENTAL

O arranjo experimental para realização dos testes de imersão rápida e resposta a um degrau de corrente é mostrado esquematicamente na figura 12.

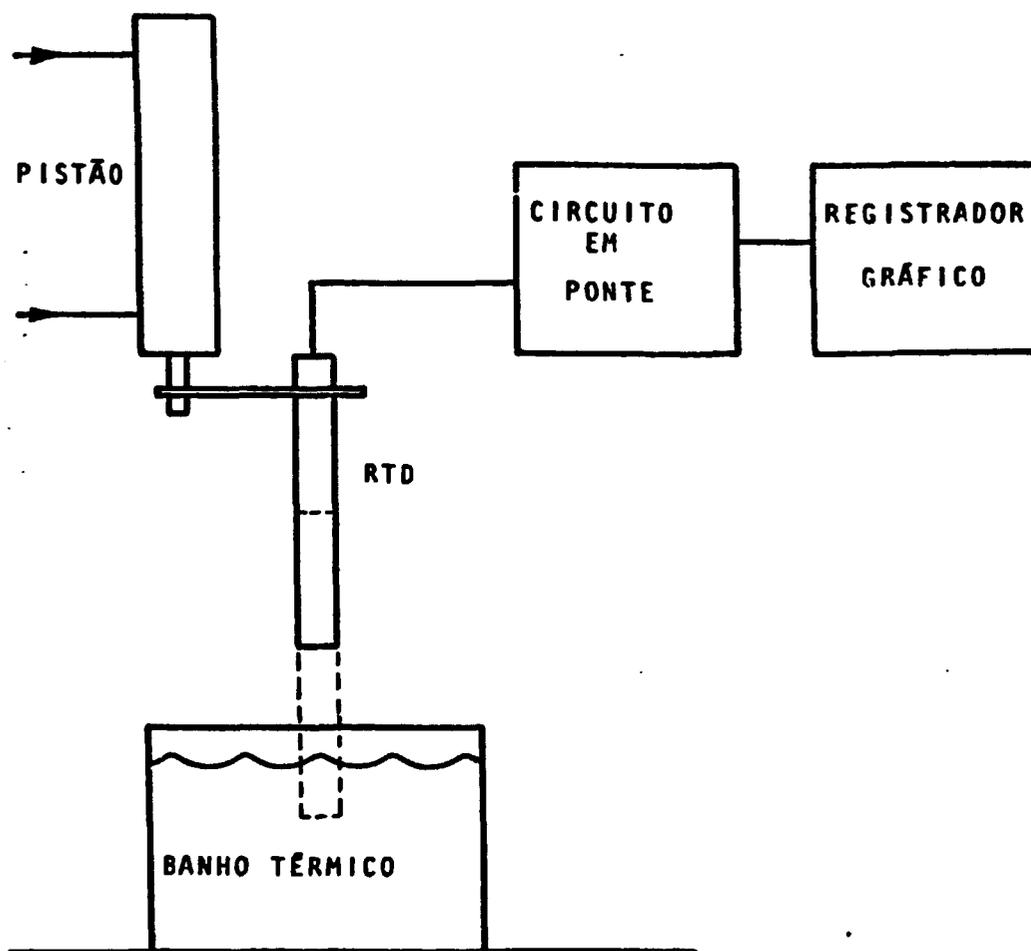


Figura 12: Arranjo experimental para teste de imersão rápida e teste de resposta a um degrau de corrente.

Basicamente, o arranjo experimental compõe-se de:

- sensor de temperatura RTD
- circuito eletrônico
- registrador gráfico
- banho térmico
- pistão.

O RTD é preso a um pistão cujo movimento de sobe - e - desce é controlado por uma válvula de cinco vias. O acionamento desta válvula por sua vez é controlado por uma chave 11

ga-desliga. Com a chave desligada, o pistão está "levantado" e o RTD está fora da água; com a chave ligada, o pistão "desce", e o RTD é mergulhado na água de um banho térmico. A temperatura da água deste banho térmico é mantida constante, e a água circula a uma vazão também constante.

Conforme a pressão do ar injetado no pistão, o movimento de descida do RTD pode ser realizado rapidamente, provocando uma súbita imersão do RTD na água, e portanto simulando o degrau de temperatura.

Os terminais do RTD são ligados a um circuito eletrônico que é usado para os dois testes. No teste de imersão rápida ele mede a variação da resistência do RTD com a temperatura, e no teste de resposta a um degrau de corrente, ele produz o degrau de corrente e mede a variação de resistência do RTD com a temperatura.

Os resultados dos testes são registrados por um registrador gráfico em forma de curvas de variação de tensão em função do tempo.

A tabela II, a seguir, fornece algumas informações a respeito dos itens: pistão, banho térmico e registrador gráfico.

Tabela 11 : Informações a respeito do pistão, banho térmico e registrador gráfico.

COMPONENTE	FABRICANTE	CARACTERÍSTICA
Pistão	Schrader-bellows	- diâmetro 1" e curso de 250mm
Banho Térmico	Gebrüder-Haake	- capacidade de até 3 litros - permite uso até 250°C - fornece vazão constante e uniforme de 4,5 litros/min
Registrador gráfico	Hewlett-Packard 7100BM	- possui um amplificador interno com ganho ajustável fornecendo valores de tensão máxima de entrada de 1mV a 100 volts. A velocidade do papel é regulável de 2,5cm/h a 5cm/s.

5.3 DETALHES E INFORMAÇÕES DO RTD UTILIZADO

A seguir são dadas algumas informações a respeito do RTD utilizado na experiência. Estas informações são fornecidas pelo fabricante⁽⁶⁾.

A figura 13 mostra um esquema do RTD.

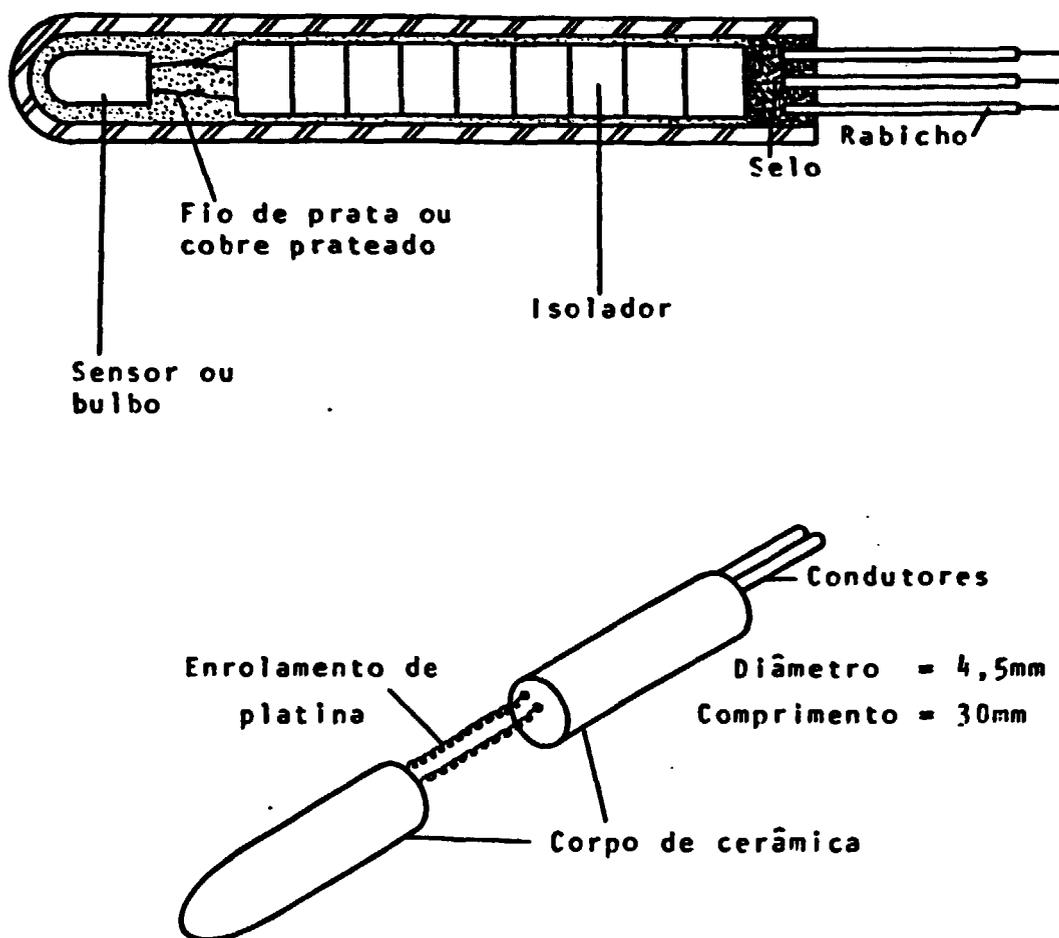


Figura 13: Esquema do RTD utilizado na experiência.

O RTD utilizado é do tipo Pt - 100: termômetro de platina com resistência de 100Ω (ohms) a 0°C .

O elemento sensor consiste em um enrolamento de platina de alta pureza encapsulado num bulbo cerâmico.

O elemento sensor é interligado ao terminal através de fios de prata ou cobre prateado, e montado em um tubo metálico de aço inox com diâmetro externo de 6 mm, tendo uma extremidade fechada com enchimento mineral (pó de óxido de magnésio) de forma a permitir uma boa transferência de calor, e protegendo o sensor contra choques mecânicos. A extremidade aberta do tubo é selada com resina epoxi, ficando assim o sensor protegido.

do contra sujeira e o ambiente de utilização.

Na tabela III estão resumidas informações a respeito do elemento sensor.

Tabela III: Informações a respeito do elemento sensor (14)

Tipo de sensor	Pt - 100						
Intervalo de temperatura	-200 a 800°C						
Estabilidade	típicamente a resistência a 0°C não muda mais que 0,04% depois de 10 choques consecutivos entre -200 e 600°C						
"self-heating"	quando testado em um banho de gelo o aumento de temperatura não excedeu 0,3°C com 10mW dissipados no detector						
Tempo de resposta	para 50% e 90% da resposta a uma mudança em degrau de 10°C da temperatura ambiente, em água fluindo a 0,4m/s						
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>% da variação</th> <th>tempo de resposta</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>50</td> <td>0,6 s</td> </tr> <tr> <td>90</td> <td>2,2 s</td> </tr> </tbody> </table>	% da variação	tempo de resposta	50	0,6 s	90	2,2 s
% da variação	tempo de resposta						
50	0,6 s						
90	2,2 s						
	Obs.: Estes valores são dados pelo fabricante <u>apenas</u> para uma orientação geral.						

5.4 CIRCUITO ELETRÔNICO

O circuito eletrônico tem por finalidade medir a variação da resistência do RTD e produzir o degrau de corrente.

O projeto do circuito eletrônico foi baseado no trabalho de Kerlin⁽¹⁰⁾, com algumas modificações de acordo com as necessidades e disponibilidades de material. A figura 14 mostra um esquema completo do circuito eletrônico montado, no qual estão especificados os componentes utilizados.

O circuito eletrônico consiste basicamente em uma ponte de Wheatstone com chave seletora de corrente. A tensão da ponte é amplificada, e o sinal de saída fornece a variação da resistência do RTD em função do tempo. O amplificador acoplado à saída da ponte possui ganho variável, que é ajustado pelo valor da resistência entre os terminais A e B. O chaveamento da chave seletora de corrente é feito por um relê que produz uma variação de corrente no RTD em forma de degrau. O circuito eletrônico inclui fonte de tensão de +15 e -15V. Além disso, é necessário o uso de uma fonte de tensão variável, externa, que neste caso fornece 18V. Esta fonte de tensão podará futuramente ser incluída no circuito.

A chave seletora de corrente proporciona um degrau de corrente através dos terminais do RTD da seguinte maneira:

Com a chave na posição 1, o transistor não está polarizado, e portanto o relê está aberto. A corrente fornecida pela fonte variável será então limitada pelo resistor de 3,5KΩ a um valor de aproximadamente 2,5mA, que é a corrente recomendada pelo fabricante para operação normal do RTD. O ba

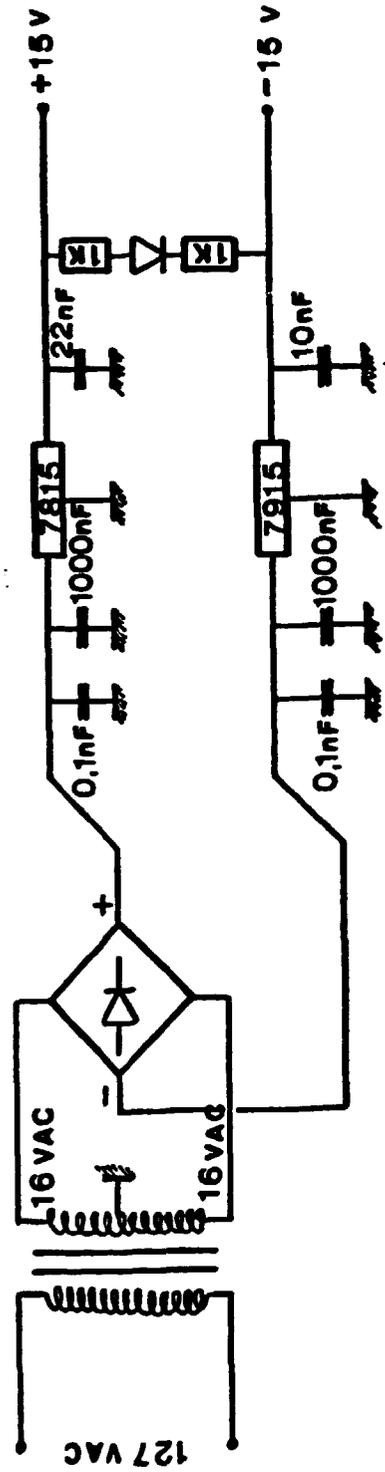
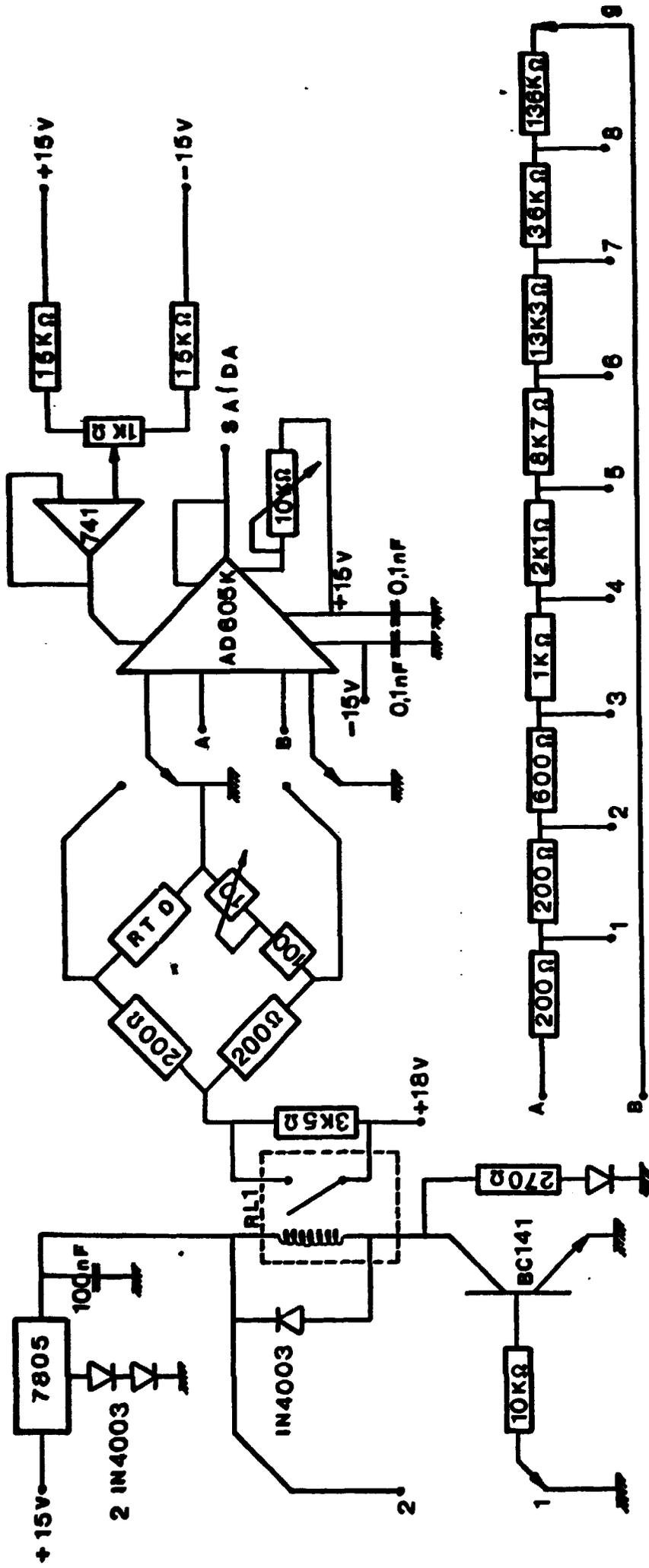


Figura 14: Circuito Eletrônico

lançamento da ponte é feito pelo resistor variável R_x para que a saída do amplificador seja zerada.

Com a chave na posição 2, o transistor ficará saturado, passando através dele uma corrente tal que feche o relê. A corrente que passa através do RTD sofrerá então um aumento em forma de degrau, pois o resistor que antes limitava a corrente está agora curto-circuitado pelo relê. A corrente que passa pelo RTD sofre um aumento em forma de degrau de 2,5mA para 60mA, como mostrado na figura 15.

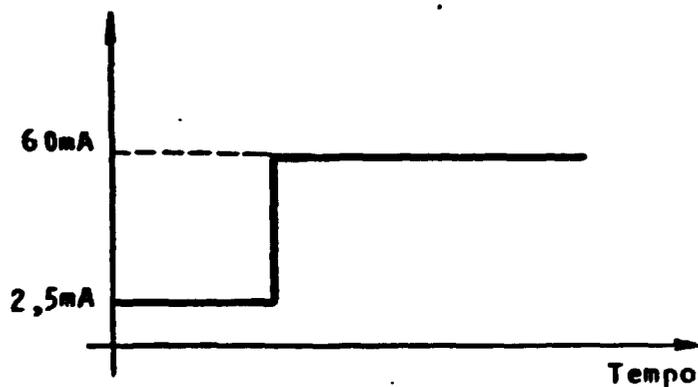


Figura 15: Variação da corrente do RTD em forma de degrau.

O procedimento da chave seletora de corrente pode ser explicado de uma forma mais simples, observando-se o esquema da figura 16.

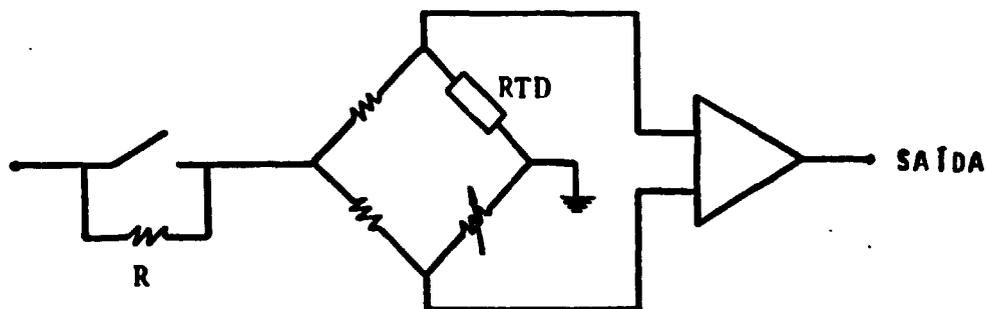


Figura 16: Circuito em ponte com a chave seletora de corrente.

Com a chave aberta, a corrente elétrica que passa através do RTD é baixa, limitada por R. Com o fechamento da chave, a corrente passa rapidamente para um valor alto, produzindo o degrau de corrente.

5.5 TESTE DE IMERSÃO RÁPIDA : PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Com o RTD fora da água, a ponte de Wheatstone é balanceada ajustando-se o resistor variável até que a tensão de saída da ponte seja nula. Mergulhando-se o RTD no banho térmico, a água do banho, que está a uma temperatura maior que a temperatura ambiente, aquece o RTD, variando a sua resistência. Isto causa um desequilíbrio na tensão de saída da ponte. Esta variação de tensão é registrada num gráfico de tensão em função do tempo, durante o transiente. Após alguns segundos, o sistema atinge novamente o estado de equilíbrio térmico, e a tensão se estabiliza num valor constante V_f .

O resultado típico de um teste de imersão rápida é mostrado na figura 17.

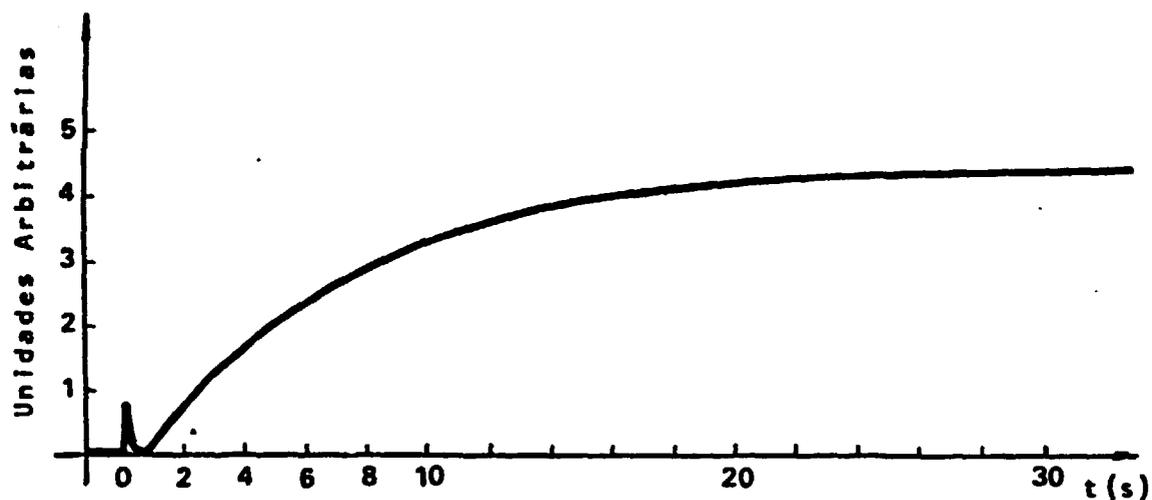


Figura 17: Resultado típico de um teste de imersão rápida.

A determinação da constante de tempo é feita diretamente no gráfico obtido, conforme mostrado na figura 18.

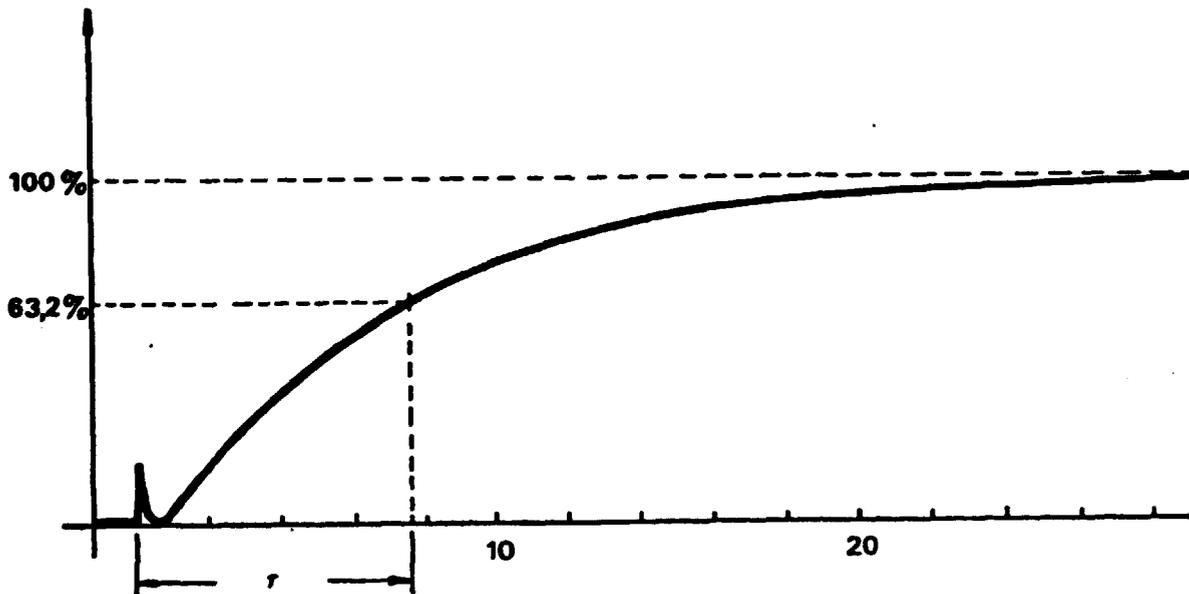


Figura 18: Determinação da constante de tempo a partir de um teste de imersão rápida.

5.6 TESTE DE RESPOSTA A UM DEGRAU DE CORRENTE:

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Com o RTD mergulhado no banho térmico, aplica-se um degrau de corrente no sensor através de seus terminais. O súbito aumento na corrente do RTD faz com que aumente o calor gerado por efeito Joule. À medida que este calor aumenta, a resistência do RTD varia, desequilibrando a ponte de Wheatstone. A tensão de saída, que era inicialmente nula, varia para aproximadamente 1V na saída do amplificador após aproximadamente 30 seg, quando então o processo de transferência de calor atinge novamente o estado de equilíbrio. O resultado típico de um teste de resposta a um degrau de corrente é mostrado na figura 19.

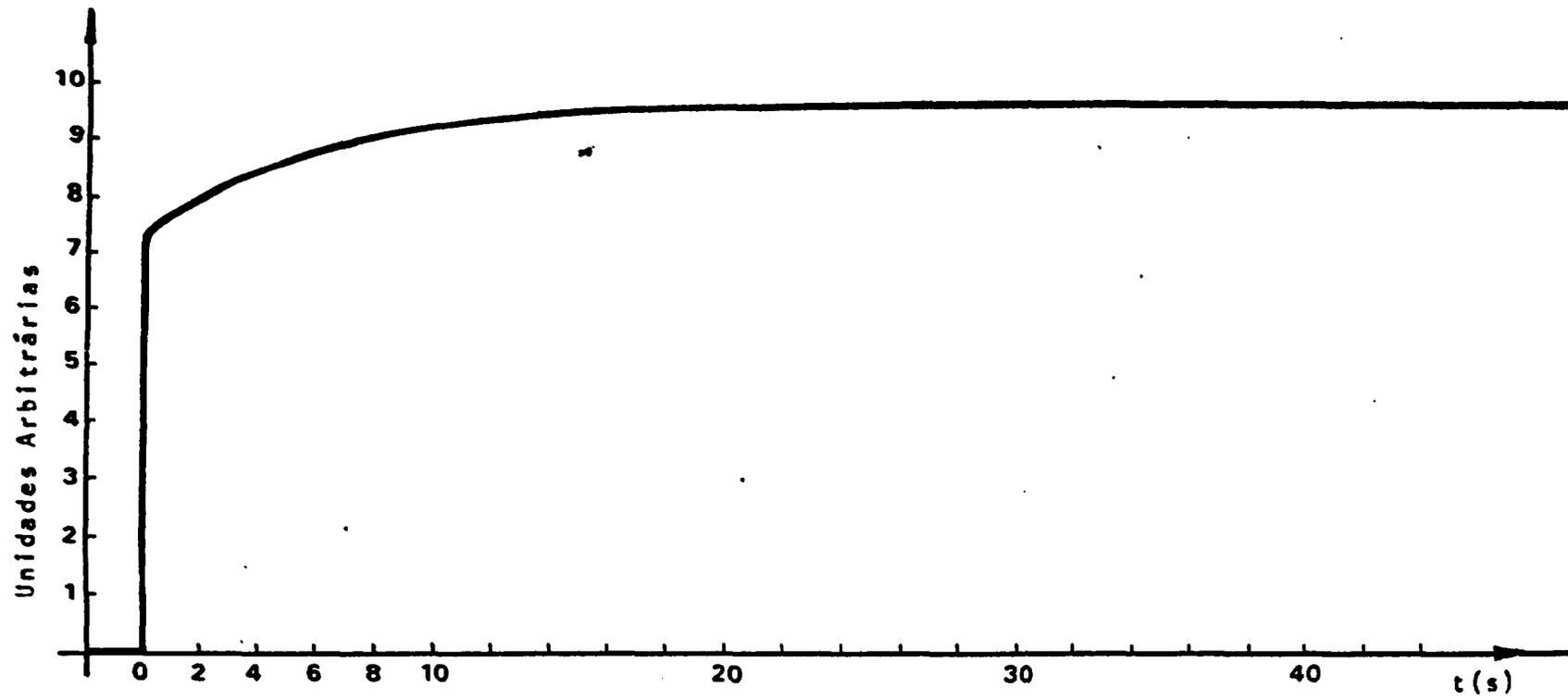


Figura 19: Resultado típico de um teste de resposta a um degrau de corrente.

Os pontos da curva obtida são ajustados utilizando o programa SAS (vide apêndice II) para obtenção dos parâmetros da equação(52):

$$T(t) = A_0 - A_1 e^{-B_1 t} - A_2 e^{-B_2 t} - \dots \quad (52)$$

Uma vez obtidos os parâmetros A_1 e B_1 , e de acordo com o que foi descrito na seção 4.4, obtêm-se a equação da curva prevista como resposta do RTD para uma variação em forma de degrau na temperatura do fluido:

$$T(t) = K \left(\frac{1}{B_1 B_2 \dots} + \frac{e^{-B_1 t}}{-s_1 (B_1 - B_2) \dots} + \dots \right) \quad (53)$$

Existem dois métodos básicos para realizar um teste de resposta a um degrau de corrente. O primeiro consiste em balancear a ponte com baixa corrente (chave aberta), fechando-se a chave para se obter um degrau positivo. O segundo consiste em balancear a ponte a alta corrente (chave fechada), abrindo-se a chave para se obter um degrau negativo. Experimentos indicam que o transiente causado por aquecimento ou resfriamento fornecem a mesma informação a respeito das características de resposta do sensor. O balanceamento a baixa corrente é usualmente preferido porque os dados são tomados durante operação a alta corrente, quando a razão sinal-ruído é maior.

5.7 PROBLEMAS OBSERVADOS NO TRABALHO EXPERIMENTAL

Nos primeiros resultados dos testes de resposta a um degrau de corrente, verificou-se que a constante de tempo obtida através da análise do teste era muito grande quando comparada com a constante de tempo obtida através do teste de imersão rápida. Após verificações nos diversos componentes da experiência, constatou-se que o problema estava no circuito eletrônico ao qual estava acoplado o RTD. Ao ser imposto o degrau de corrente, alguns componentes do circuito também se aqueciam, variando suas características. Assim sendo, o circuito tinha um tempo de resposta inerente que se somava ao tempo de resposta do RTD, resultando numa distorção do resultado.

O circuito foi refeito, tendo-se o cuidado de usar componentes menos sensíveis quanto à variação de corrente e temperatura. Para confirmação de que o problema anterior fora solucionado, fez-se um teste de resposta a um degrau de corrente colocando-se uma resistência fixa no lugar do RTD, e a tensão de saída do circuito permaneceu constante. Desta forma, garante-se que a variação da tensão de saída da ponte de Wheatstone durante um teste de resposta a um degrau de corrente é devida apenas à variação da resistência do RTD. Uma vez feita a modificação no circuito eletrônico, os resultados obtidos através do teste de resposta a um degrau de corrente tornaram-se bem mais próximos aos valores obtidos através dos testes de imersão rápida.

Nas curvas obtidas nos testes de imersão rápida observa-se um pequeno pico de tensão no início do transiente, como mostrado na figura 20:

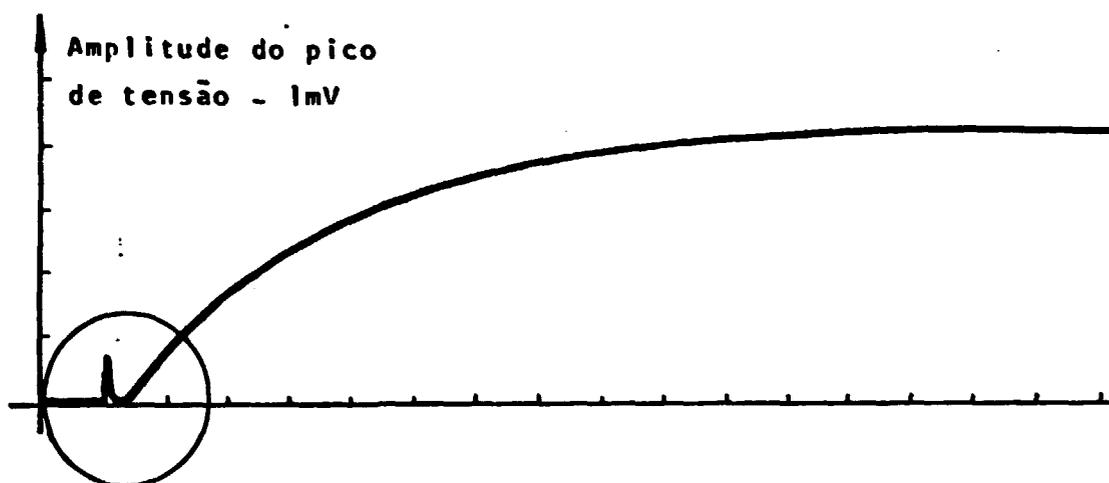


Figura 20: Pico de tensão observado no teste de imersão rápida.

As possíveis causas deste pico foram analisadas e, dentre outras, verificou-se que a válvula que acionava os movimentos de sobe-e-desce do pistão, por ser uma válvula do tipo solenóide, gera um pulso eletromagnético (faísca) que é transmitido pela rede elétrica para os demais componentes eletrônicos da experiência, e registrado no gráfico como um pico de tensão. Experimentou-se então retirar a válvula e controlar manualmente o movimento do pistão, injetando o ar comprimido diretamente ora num bocal e ora noutro. Desta forma, o pico de tensão diminuiu, porém não foi totalmente eliminado.

Outro motivo para o aparecimento do pico de tensão está relacionado com o impacto causado pela descida brusca do pistão. O elemento sensor é construído de forma a permitir a dilatação do enrolamento de platina, e por isso é sensível a vibrações. Isso foi confirmado, pois introduzindo-se o RTD suavemente na água do banho térmico, o pico de tensão não apareceu mais.

Desde que a simulação do degrau de corrente deve ser feita mergulhando o RTD rapidamente na água, optou-se por realizar as experiências de forma tal que a descida do RTD seja

rápida o suficiente para simular o degrau de temperatura, embo
ra permaneça um pequeno pico de tensão.

CAPÍTULO 6

6. RESULTADOS

6.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Foram feitos cinco testes de resposta a um degrau de corrente, nas mesmas condições de temperatura e vazão. Os resultados obtidos são mostrados nas figuras 21 a 25.

Conforme mencionado no resumo teórico, a equação resultante de um teste de resposta a um degrau de corrente é dada por uma somatória de exponenciais:

$$T(t) = \sum_i A_i e^{-B_i t} \quad (54)$$

Para cada teste, foram ajustados os coeficientes da equação que melhor descreve a curva.

Com os dados obtidos nos testes, só foi possível identificar os dois primeiros termos do somatório, ou seja, a equação (54) se reduziu a:

$$T(t) = A_0 - A_1 e^{-B_1 t} \quad (55)$$

O ajuste dos dados à curva teórica foi efetuado usando-se um procedimento do programa SAS (vide apêndice II), e os coeficientes obtidos para cada teste de resposta a um degrau de corrente são mostrados na tabela IV, juntamente com os res

pectivos valores de desvio padrão. A_0 é o valor de estado estacionário, e foi mantido fixo durante a execução do programa.

Tabela IV: Coeficientes das curvas de resposta a um degrau de corrente

Nº do teste	A_0	A_i	Desvio padrão	B_1	Desvio padrão
1	100	24,00039798	0,41647007	0,13299373	0,00313361
2	94	22,86011351	0,18300018	0,16252411	0,00171166
3	95,5	23,08406552	0,20164636	0,16828161	0,00192425
4	94,5	22,53450058	0,19690326	0,15753049	0,00181866
5	96	23,33818356	0,14030015	0,17126970	0,00134462

Conforme mostrado na seção 4.4, os coeficientes da curva obtida no teste de resposta a um degrau de corrente podem ser utilizados para prever a resposta do RTD quando a temperatura do fluido onde ele está imerso sofre uma perturbação em forma de degrau. Essa resposta, no caso de termos apenas um coeficiente exponencial, é dada por:

$$T(t) = i - e^{-B_1 t} \quad (56)$$

Neste caso, a constante de tempo τ é dada por:

$$\tau = \frac{1}{B_1} \quad (57)$$

Os valores de τ previstos a partir dos cinco testes de resposta a um degrau de corrente são dados na tabela V.

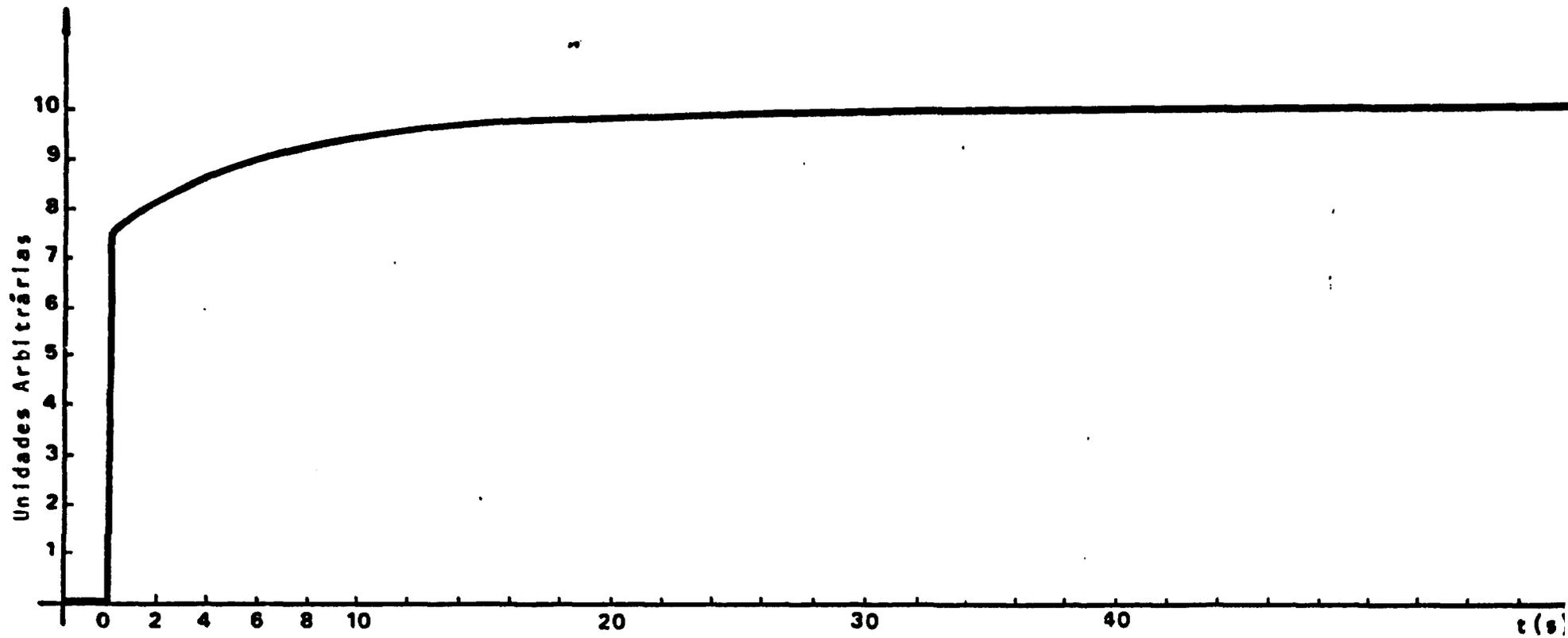


Figura 21: Teste de resposta a um degrau de corrente nº 1.

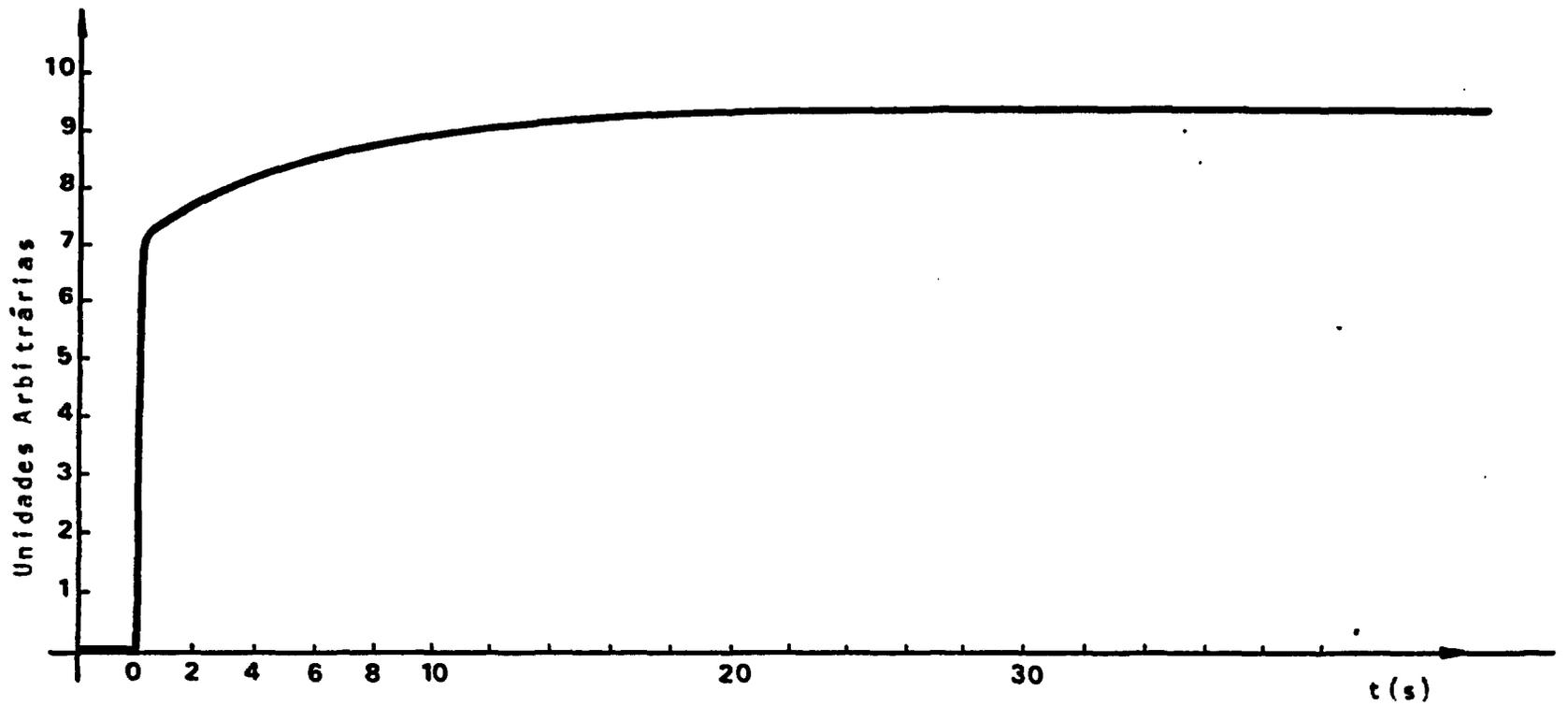


Figura 22: Teste de resposta a um degrau de corrente nº 2.

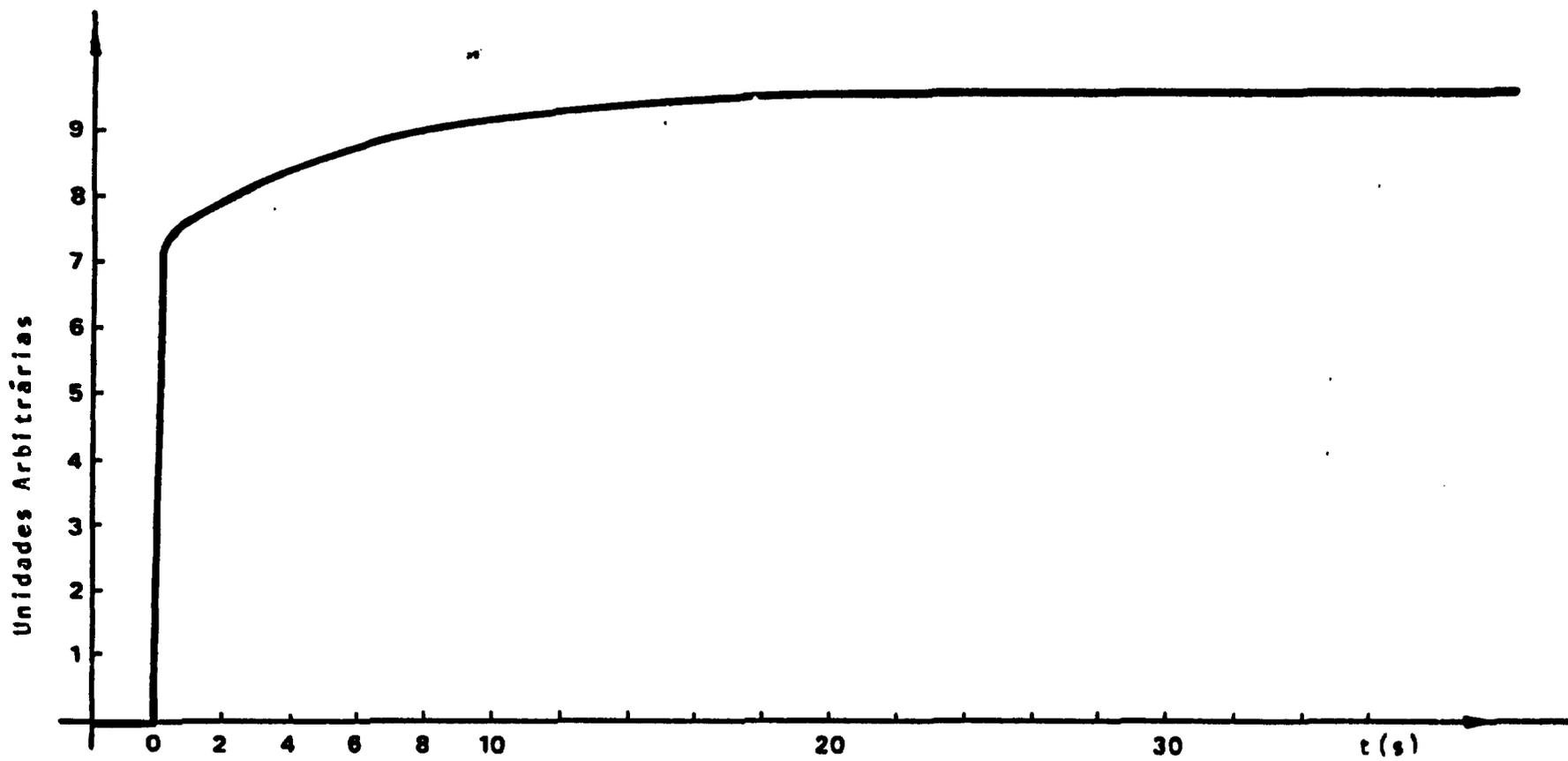


Figura 23: Teste de resposta a um degrau de corrente nº 3.

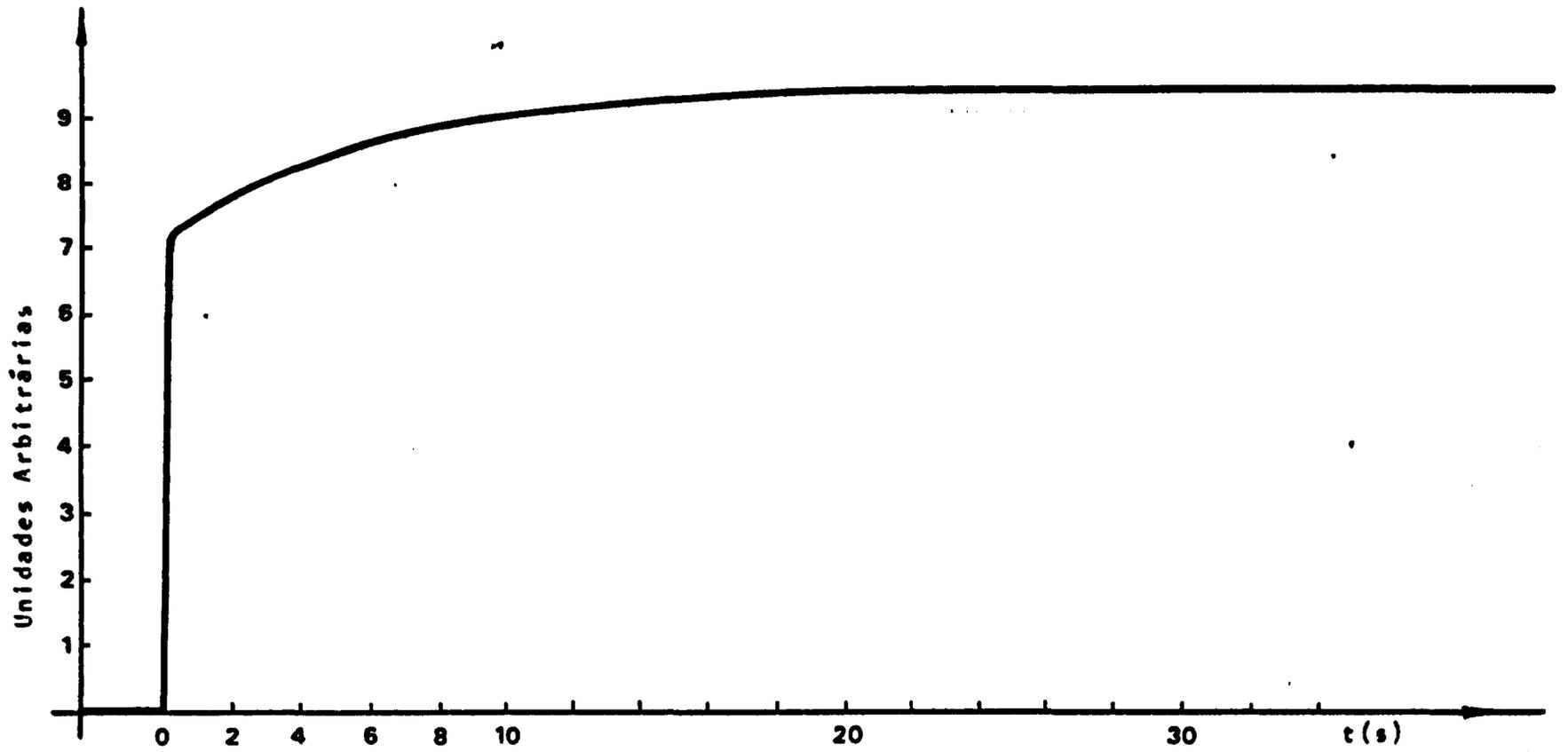


Figura 24: Teste de resposta a um degrau de corrente nº 4.

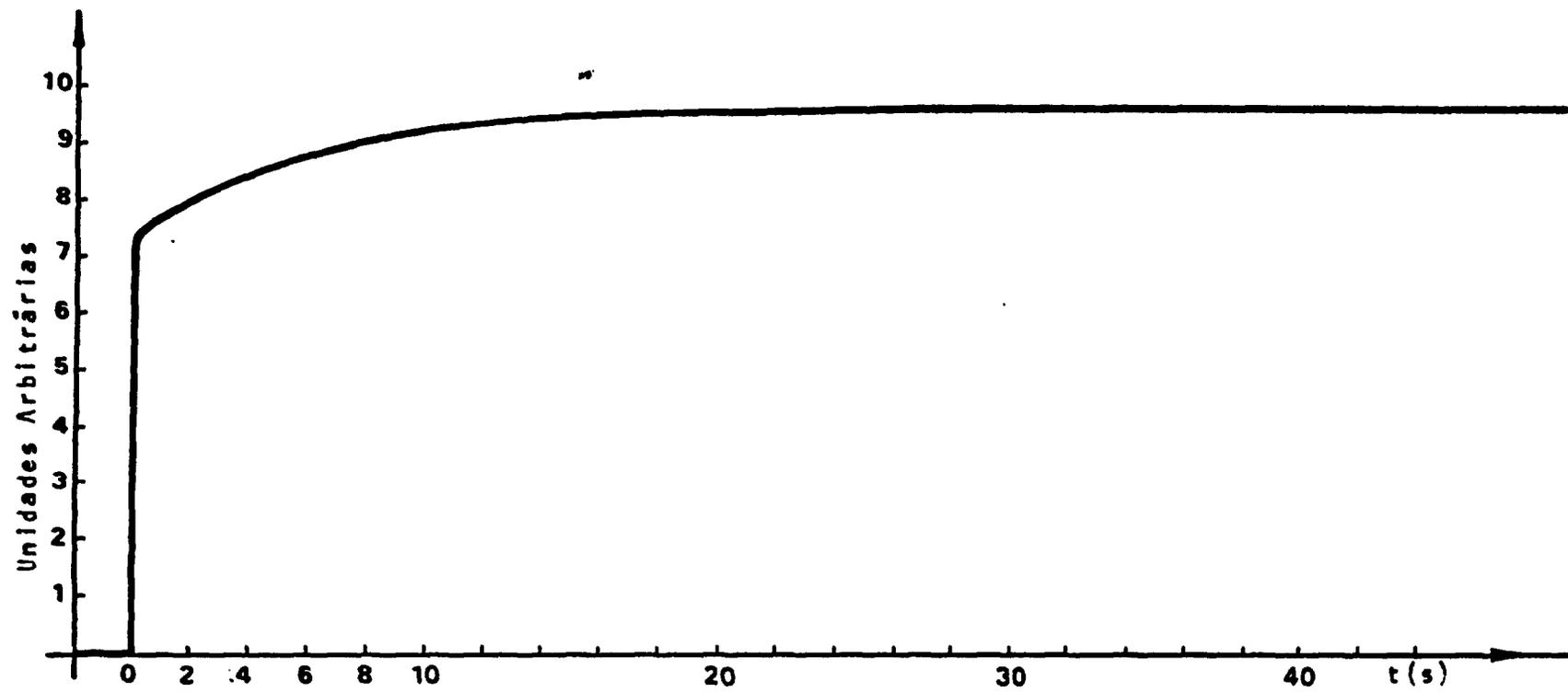


Figura 25: Teste de resposta a um degrau de corrente nº 5.

Tabela V: Valores de τ previstos a partir dos testes de resposta a um degrau de corrente

Nº do teste	Constante de tempo τ (segundos)
1	7,52
2	6,15
3	5,94
4	6,35
5	5,84

O valor médio obtido para a constante de tempo foi de 6,36s com 0,6769 de desvio padrão.

6.2 VALIDAÇÃO DO MÉTODO

Com a finalidade de validar o método, foram feitos cinco testes de imersão rápida nas mesmas condições de temperatura e vazão em que foram feitos os testes de resposta a um degrau de corrente. As curvas obtidas estão nas figuras 26 a 30. Os valores de τ correspondentes estão na tabela VI.

Tabela VI: Constante de tempo obtida nos testes de imersão rápida

Teste de imersão rápida	Constante de tempo τ (segundos)
1	7,4
2	7,3
3	7,2
4	7,4
5	7,6

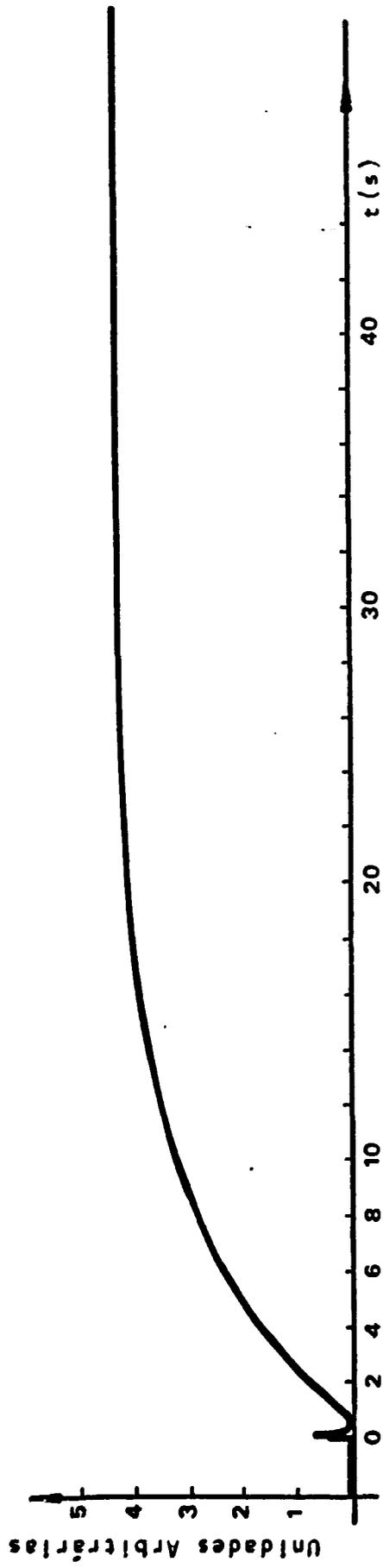


Figura 26: Teste de imersão rápida nº 1.

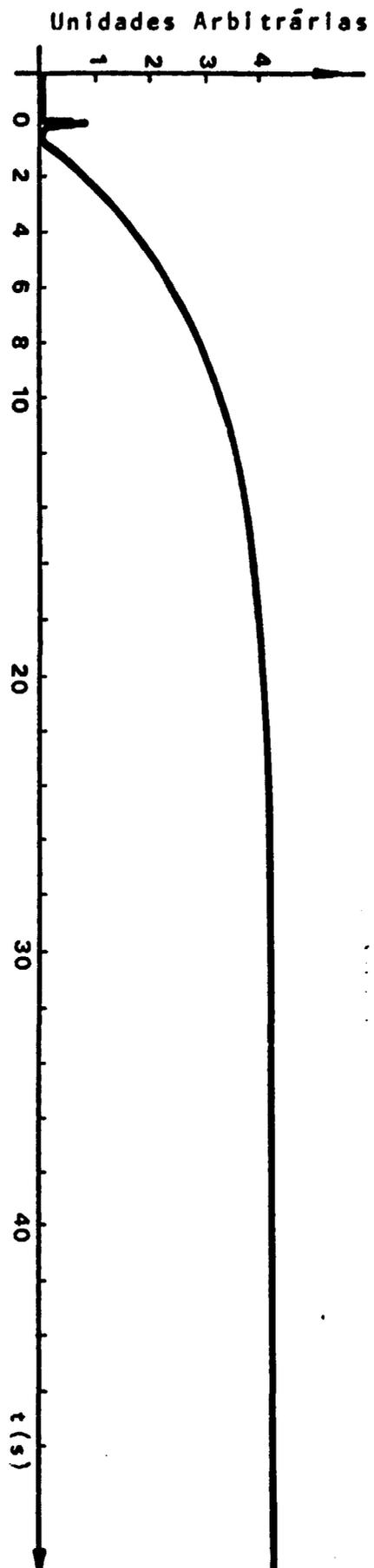


Figura 27: Teste de Imersão rápida nº 2.

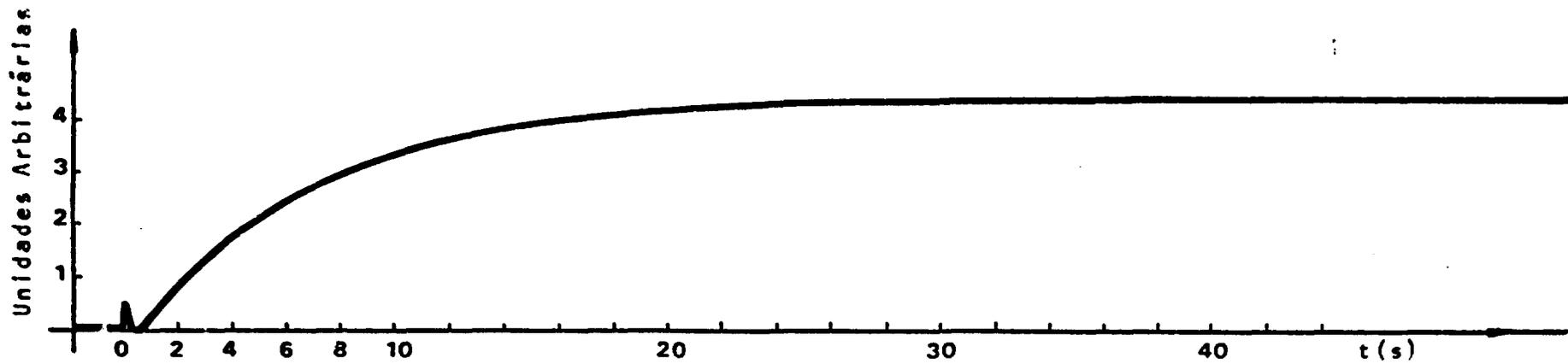


Figura 28: Teste de imersão rápida nº 3.

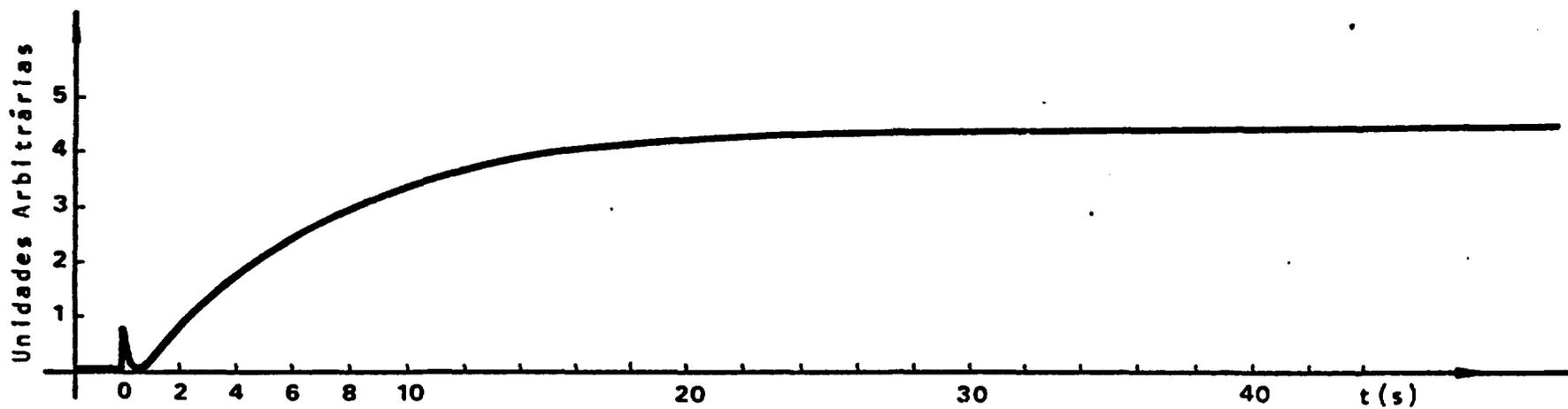


Figura 29: Teste de imersão rápida nº 4.

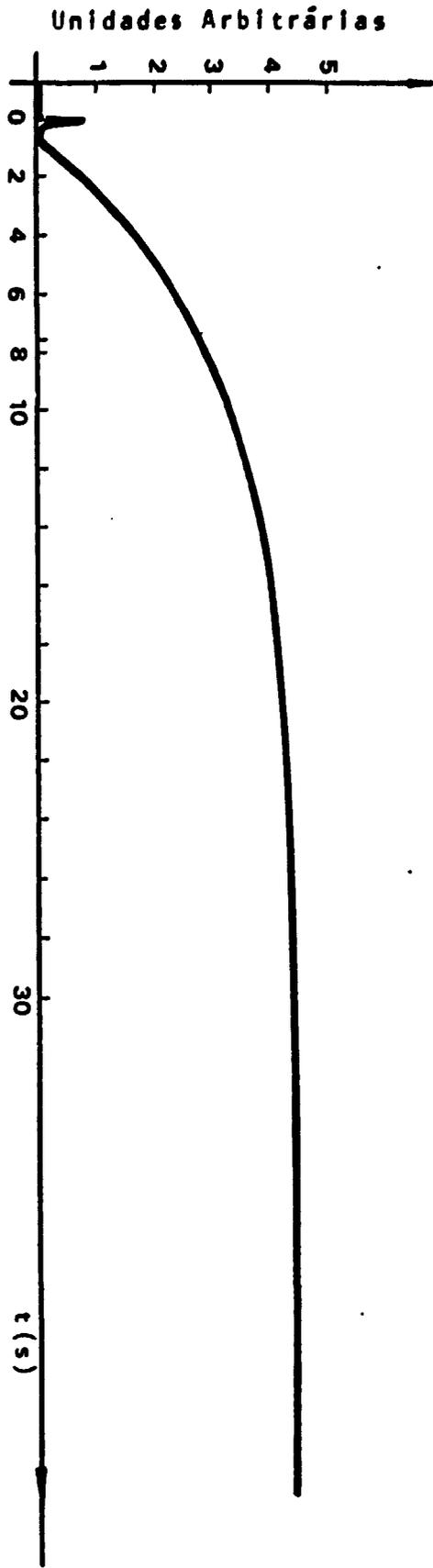


Figura 30: Teste de imersão rápida nº 5.

O valor médio de τ foi de 7,38s e o desvio padrão 0,1483.

As curvas resultantes dos testes de imersão rápida foram comparadas com as curvas previstas a partir dos testes de resposta a um degrau de corrente. No gráfico da figura 31 foram traçadas duas curvas normalizadas: a curva média dos cinco testes de imersão rápida, e a curva média prevista a partir dos cinco testes de resposta a um degrau de corrente. Os valores das duas curvas estão na tabela VII.

Considerando que o valor da constante de tempo prevista a partir do teste de resposta a um degrau de corrente difere 14% da constante de tempo obtida do teste de imersão rápida, pode-se afirmar que o método de obtenção da constante de tempo de sensores do tipo RTD por meio de uma perturbação em forma de degrau na corrente que alimenta o mesmo está validado.

Tabela VII: Comparação entre o resultado do teste de imersão rápida e a curva prevista a partir do teste de resposta a um degrau de corrente.

t (segundos)	Resultado previsto para teste de imersão rápida	Resultado do teste de imersão rápida
1	0,1467	0,0333
2	0,2720	0,1613
3	0,3787	0,2867
4	0,4693	0,3867
5	0,5473	0,4720
6	0,6133	0,5507
7	0,6700	0,6160
8	0,7187	0,6673
9	0,7600	0,7200
10	0,7953	0,7613
11	0,8253	0,8007
12	0,8507	0,8313
13	0,8727	0,8567
14	0,8913	0,8800
15	0,9073	0,8960
16	0,9207	0,9120
17	0,9327	0,9260
18	0,9420	0,9347
19	0,9507	0,9447
20	0,9580	0,9533
22	0,9693	0,9673
24	0,9780	0,9767
26	0,9840	0,9853
28	0,9880	0,9913
30	0,9913	0,9987
32	0,9940	1,0000
34	0,9953	.
36	0,9967	.
38	0,9973	.
40	0,9980	1,0000

CAPÍTULO 7

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

7.1 CONCLUSÕES

O método do teste de resposta a um degrau de corrente é válido para estimar a constante de tempo de sensores de temperatura do tipo RTD.

É um teste que pode ser realizado com o sensor instalado em seu local de operação normal, ou seja, é um teste "in-situ". Além disso, o teste pode ser realizado de um local remoto, e não requer modificações nos equipamentos da central nuclear.

O desenvolvimento teórico do teste de resposta a um degrau de corrente é independente do número de nós do modelo, e portanto a aproximação matemática feita em malha de nós não implica em nenhuma suposição restritiva.

Perto de $t=0$, porém um modelo exponencial de 1ª ordem não representa adequadamente a forma da curva obtida no teste de imersão rápida, já que o mesmo possui um tempo morto. Este tempo morto é devido ao fato de que no teste de imersão rápida o calor é transferido do fluido para o sensor, e tem que atravessar as camadas de encapsulamento de aço inox, isolante mineral e bulbo cerâmico até atingir o filamento de platina.

Modelos de ordens superiores conseguem representar melhor o comportamento da curva perto de $t=0$ ⁽⁷⁾ e portanto o re

sultado do teste de resposta a um degrau de corrente será tão preciso quanto mais termos exponenciais puderem ser identificados.

Das curvas obtidas nos testes de resposta a um degrau de corrente, só foi possível identificar o termo de 1ª ordem, o que significa que a curva prevista não considera o atraso na subida da curva correspondente ao valor do tempo morto. Isto pode ser visto no gráfico da figura 31 onde a curva prevista a partir do teste de resposta a um degrau de corrente está "adiantada" aproximadamente 1 segundo em relação à curva obtida no teste de imersão rápida.

A constante de tempo prevista a partir do teste de resposta a um degrau de corrente foi de 6,36s enquanto a constante de tempo obtida do teste de imersão rápida foi de 7,38s, e portanto o erro foi de 14%. Dos testes realizados pode-se concluir que o teste de resposta a um degrau de corrente permite obter a constante de tempo com precisão entre 10 e 15%, um desvio aceitável considerando a simplicidade do método.

7.2 RECOMENDAÇÕES

O erro encontrado no valor da constante de tempo prevista a partir de um teste de resposta a um degrau de corrente pode ser diminuído se forem usados métodos que consigam identificar os termos exponenciais de ordens superiores. Um meio de se tentar conseguir isso, é melhorar o sistema de aquisição de dados, por exemplo, utilizando-se um sistema de aquisição de dados digital.

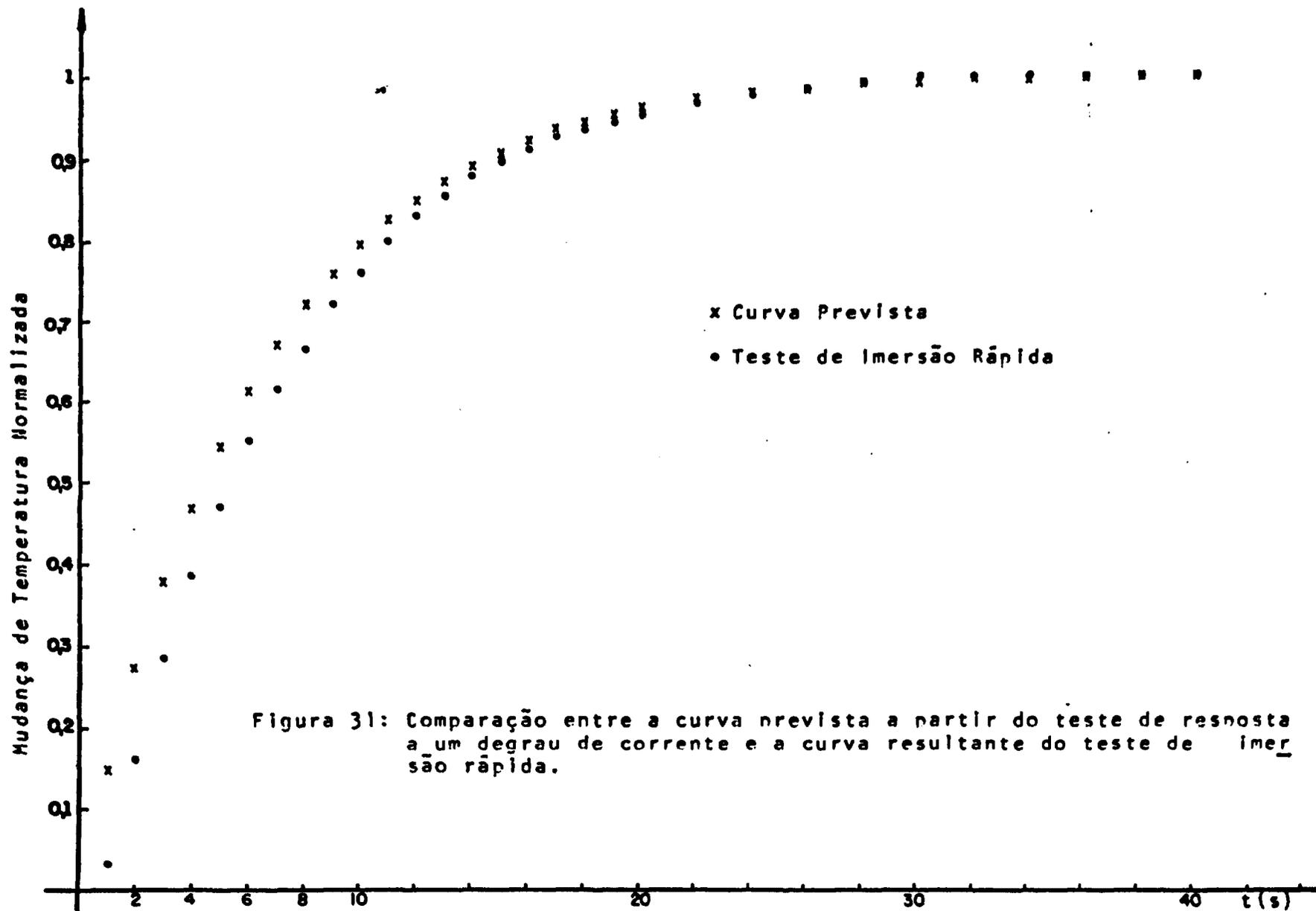


Figura 31: Comparação entre a curva prevista a partir do teste de resposta a um degrau de corrente e a curva resultante do teste de imersão rápida.

Como trabalho experimental envolvendo o estudo de pa
râmetros de sensores de temperatura, recomenda-se uma melhor
investigação do efeito da vazão no tempo de resposta de RTD's
e termopares. Experiências neste sentido podem ser facilmente
montadas aproveitando parte dos equipamentos utilizados neste
trabalho, e substituindo-se o banho térmico por um tanque ro
tativo. Introduzindo o RTD ou o termopar em diferentes posi
ções radiais, obtêm-se a constante de tempo para diferentes va
lores de vazão.

O método do teste de resposta a um degrau de corren
te pode teoricamente ser usado para determinar a constante de
tempo de termopares e RTD's de diferentes tamanhos, materiais
e geometrias. Assim sendo, um outro trabalho recomendado é o
estudo de viabilidade da aplicação do teste para termopares.

APÊNDICE I

DEPENDÊNCIA DO TEMPO DE RESPOSTA COM AS CONDIÇÕES LOCAIS

A resposta de um RTD a um transiente de temperatura depende das propriedades físicas e térmicas do sensor e do seu meio ambiente. Dois fatores locais que influenciam as propriedades pelas quais a resposta do sensor é caracterizada são: temperatura e vazão.

A dependência do tempo de resposta com estes dois fatores será discutida a seguir.

DEPENDÊNCIA DO TEMPO DE RESPOSTA COM A TEMPERATURA

Quando a temperatura aumenta, as dimensões dos materiais do sensor podem mudar. Se a dimensão muda devido à expansão dos "gaps" preenchidos por gás, a resistência de transferência de calor do sensor poderá aumentar e resultar em uma resposta mais lenta. Por outro lado, poderia ocorrer a redução dos "gaps" se a expansão de outros materiais comprimisse os espaços de "gap". Isto poderia diminuir a resistência de transferência de calor do sensor e causar uma resposta mais rápida. Portanto, o efeito líquido pode ser tanto uma resposta mais rápida quanto uma mais lenta⁽¹⁰⁾.

Foram feitos testes de imersão rápida com o fluido em duas temperaturas diferentes: 35°C e 60°C. Os valores das constantes de tempo, valor médio e desvio padrão estão na tabela VIII.

Tabela VIII; Constante de tempo para duas temperaturas diferentes

Temperatura	τ (seg)	$\bar{\tau}$ (seg)	Desvio Padrão
35°C	7,6	7,33	0,3055
	7,4		
	7,0		
60°C	6,8	6,73	0,1155
	6,6		
	6,8		

Dos valores da tabela VIII pode-se notar que a constante de tempo diminui um pouco com o aumento da temperatura.

DEPENDÊNCIA DO TEMPO DE RESPOSTA COM A VAZÃO

A resistência de transferência de calor de superfície de um RTD depende da velocidade do escoamento à qual o sensor é exposto. Uma alta vazão aumenta o coeficiente de transferência de calor de superfície e melhora o tempo de resposta do sensor (10).

A fim de se visualizar a influência da vazão na constante de tempo, foram feitos testes de imersão rápida para:

- a. vazão = 0 (circulação desligada)
- b. vazão nominal (circulador ligado)
- c. vazão alta (circulação nominal e mais uma agitação da água feita manualmente com um bastão).

A temperatura da água do banho térmico foi mantida constante durante os testes (55°C).

Os resultados dos testes estão no gráfico da figura 32, e os valores da constante de tempo τ estão na tabela IX, nos quais pode-se notar que quanto maior for a vazão, menor será a constante de tempo.

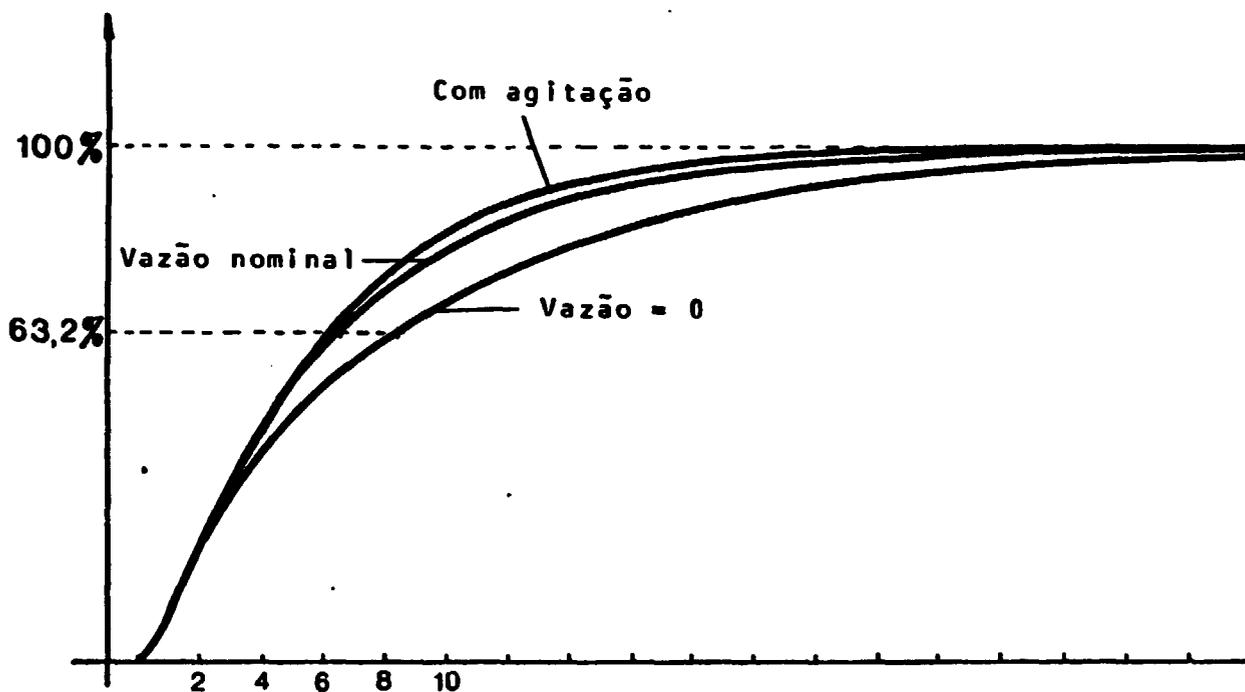


Figura 32: Testes de imersão rápida para três vazões diferentes.

Tabela IX : Valores de constante de tempo para três vazões diferentes

Vazão	τ (segundos)
0	8,6
Nominal	6,6
Alta	6,4

APÊNDICE II

OBTENÇÃO DE PARÂMETROS COM O PROGRAMA SAS

SAS (Statistical Analysis System) é um sistema de computação para análise de dados. Fornece meios para:

- armazenamento e recuperação de informações
- modificação e programação de dados
- análises estatísticas
- manuseio de arquivos

O PROGRAMA NLIN

O sistema de computação SAS possui vários programas ou "procedures" para o ajuste de curvas. A "procedure" NLIN (non linear regression) ajusta modelos de regressão não linear usando a técnica dos mínimos quadrados. Modelos não lineares são mais difíceis de especificar e estimar do que modelos lineares. Em alguns casos, não há garantia de que o programa consiga ajustar o modelo com sucesso.

Para realizar o ajuste deve-se especificar a expressão da regressão, declarar nomes dos parâmetros, sugerir valores iniciais para os parâmetros e especificar derivadas do modelo em relação aos parâmetros. NLIN primeiramente examina as especificações dos valores de inicialização dos parâmetros; com os valores especificados, NLIN calcula o resíduo da soma dos quadrados de cada combinação de valores, para determinar o melhor arranjo de valores. Este iniciará o algoritmo iterativo, que pode ser um dos quatro métodos seguintes:

- Gauss-Newton modificado
- Marquardt
- Gradiente ou "steepest descent"
- Secante multivariado ou falsa posição (DUD)

O método utilizado nos ajustes foi o DUD.

Método Secante Multivariado (DUD)

O método secante multivariado é semelhante ao método Gauss-Newton, exceto que as derivadas são estimadas das iterações anteriores ao invés de serem calculadas analiticamente. O método é também chamado método de falsa posição ou método DUD. Se apenas um parâmetro é estimado, a derivada da iteração $i+1$ pode ser estimada a partir das duas iterações anteriores. Quando k parâmetros devem ser estimados, o método usa as últimas $k + 1$ iterações para estimar as derivadas.

Uso do Programa NLIN para obtenção de parâmetros

De acordo com o modelo dinâmico proposto para o RTD o resultado do teste de resposta a um degrau de corrente é da forma:

$$T(t) = K \left[\frac{(-z_1)(-z_2) \dots (-z_N)}{(-p_1)(-p_2) \dots (-p_N)} + \frac{(p_1 - z_1)(p_1 - z_2) \dots (p_1 - z_N)}{(p_1)(p_1 - p_2) \dots (p_1 - p_N)} e^{p_1 t} + \dots \right]$$

e o resultado para o teste de imersão rápida é da forma:

$$T(t) = K \left[\frac{1}{(-p_1)(-p_2) \dots (-p_N)} + \frac{1}{(p_1)(p_1 - p_2) \dots (p_1 - p_N)} e^{p_1 t} + \dots \right]$$

Desde que os termos exponenciais são iguais, pois dependem apenas das resistências de transferência de calor e capacidades caloríficas, pode-se prever o resultado de uma variação em forma de degrau na temperatura a partir de um teste de resposta a um degrau de corrente. Para isso, deve-se ajustar os dados obtidos em um teste de resposta a um degrau de corrente a uma equação da forma:

$$T(t) = A_0 - A_1 e^{-B_1 t} - A_2 e^{-B_2 t} - \dots$$

e usar os B_i para construir a equação da curva de resposta prevista para uma variação em forma de degrau na temperatura do fluido.

O ajuste foi feito usando-se a "procedure" NLIN do programa SAS.

Os valores iniciais para os parâmetros foram obtidos traçando-se a curva resultante do teste de resposta a um degrau de corrente em papel monolog e decompondo-a em tantas retas quantas possíveis. Os coeficientes angulares das retas serão os B_i da equação, e os coeficientes lineares serão os A_i .

Como exemplo, é mostrado a seguir o procedimento feito para determinar os parâmetros da curva obtida no teste de resposta a um degrau de corrente nº 2.

O gráfico obtido do teste de resposta a um degrau de corrente nº 2 é visto na figura 22.

Os pontos deste gráfico foram traçados em papel monolog, no qual fêz-se a decomposição da curva em retas. Neste caso, só foi possível decompor a curva em duas retas: uma de inclinação zero, correspondente ao valor de estado estacionário, e outra de inclinação diferente de zero.

A figura 33 mostra a curva traçada em papel monolog, e as retas obtidas da decomposição, que forneceram os seguintes valores dos parâmetros da curva:

$$A_0 = 94,0$$

$$A_1 = 23,0$$

$$B_1 = 0,1666$$

Estes valores foram usados para iniciar o ajuste da curva.

A listagem de saída do programa SAS é mostrada a seguir, contendo os valores de A_1 e B_1 com os respectivos valores de desvio padrão (A_0 é mantido constante), valores fornecidos (Y) e valores ajustados (PE) com o resíduo correspondente (RE), e um gráfico contendo os pontos lidos e os pontos da curva ajustada.

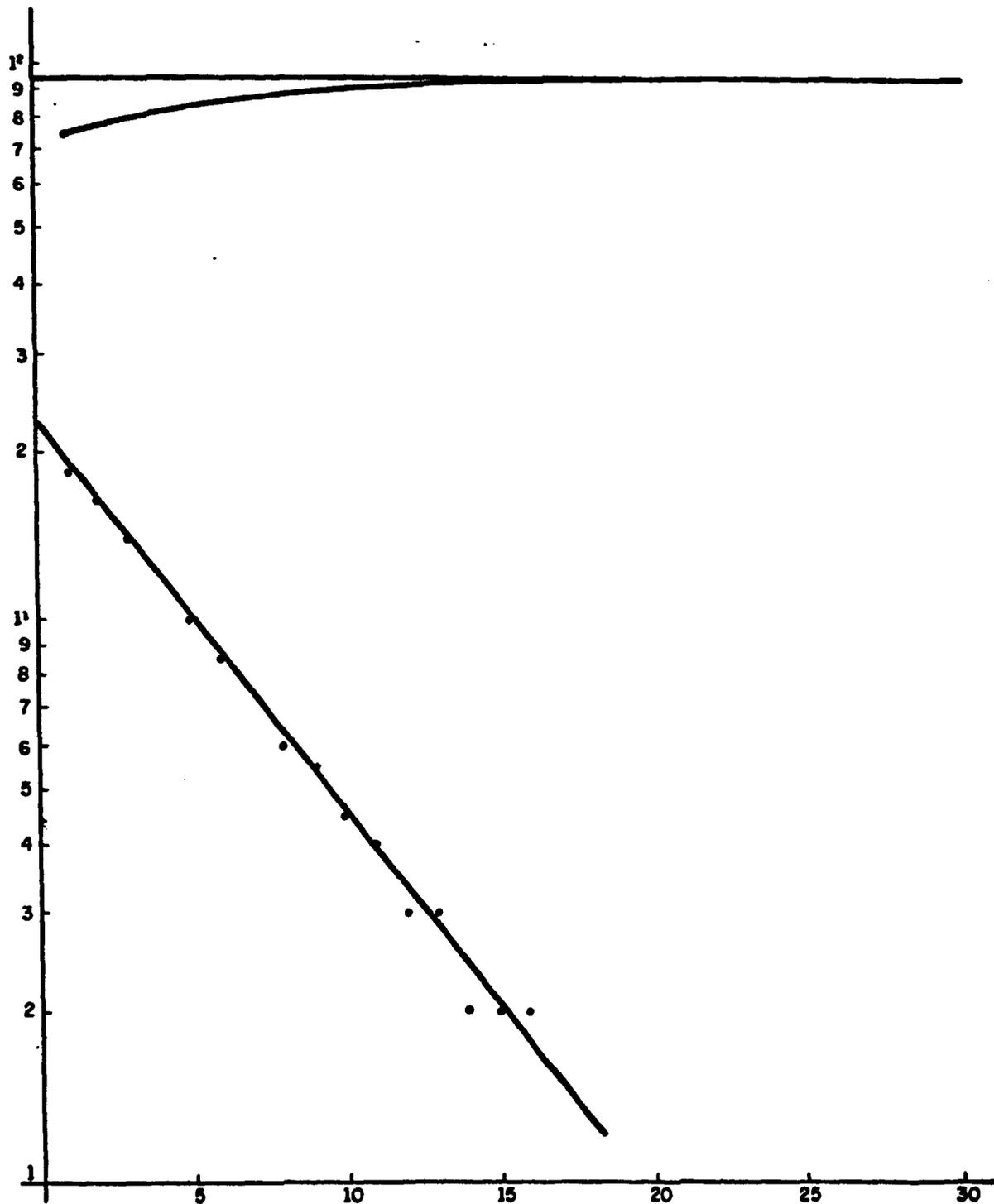


Figura 33: Decomposição da curva obtida no teste de resposta a um degrau de corrente.

SAS

NON-LINEAR LEAST SQUARES GRID SEARCH DEPENDENT VARIABLE Y

A1	B1	RESIDUAL SS
24	0.18	4.34754171
25	0.18	5.52233018
24	0.16	5.71784890
26	0.18	11.31047659
26	0.20	14.94280269
25	0.16	15.50759222
25	0.20	15.86114025
24	0.20	20.84514064
26	0.16	30.59532218
24	0.14	37.04276806

SAS

NON-LINEAR LEAST SQUARES ITERATIVE PHASE

DEPENDENT VARIABLE: Y

METHOD: DUD

ITERATION	A 1	B 1	RESIDUAL SS
-3	24.00000000	0.18000000	4.34754171
-2	26.40000000	0.16000000	14.91747538
-1	24.00000000	0.19800000	18.62497400
0	24.00000000	0.18000000	4.34754171
1	22.71435481	0.15969373	0.94644085
2	22.87647826	0.16276112	0.82745826
3	22.87900725	0.16276000	0.82742806
4	22.85972793	0.16252014	0.82674708
5	22.86012644	0.16252428	0.82674692

NOTE: ITERATIONS RESTARTED USING A SMALLER GRID AROUND ABOVE PARAMETERS.

-3	22.86012644	0.16252428	0.82674692
-2	22.88298656	0.16252428	0.82810613
-1	22.86012644	0.16268680	0.82753221
0	22.86012644	0.16252428	0.82674692
1	22.86011351	0.16252411	0.82674692

NOTE: CONVERGENCE CRITERION MET.

SAS

NON-LINEAR LEAST SQUARES SUMMARY STATISTICS DEPENDENT VARIABLE 'Y

SOURCE	DF	SUM OF SQUARES	MEAN SQUARE
REGRESSION	2	198496.13325308	99248.06662654
RESIDUAL	23	0.82674692	0.03594552
UNCORRECTED TOTAL	25	198496.96000000	
(CORRECTED TOTAL)	24	721.08160000	

PARAMETER	ESTIMATE	ASYMPTOTIC STD. ERROR	ASYMPTOTIC 95 % CONFIDENCE INTERVAL	
			LOWER	UPPER
A1	22.86011351	0.18300018	22.48155184	23.23867518
B1	0.16252411	0.00171166	0.15898330	0.16606492

ASYMPTOTIC CORRELATION MATRIX OF THE PARAMETERS

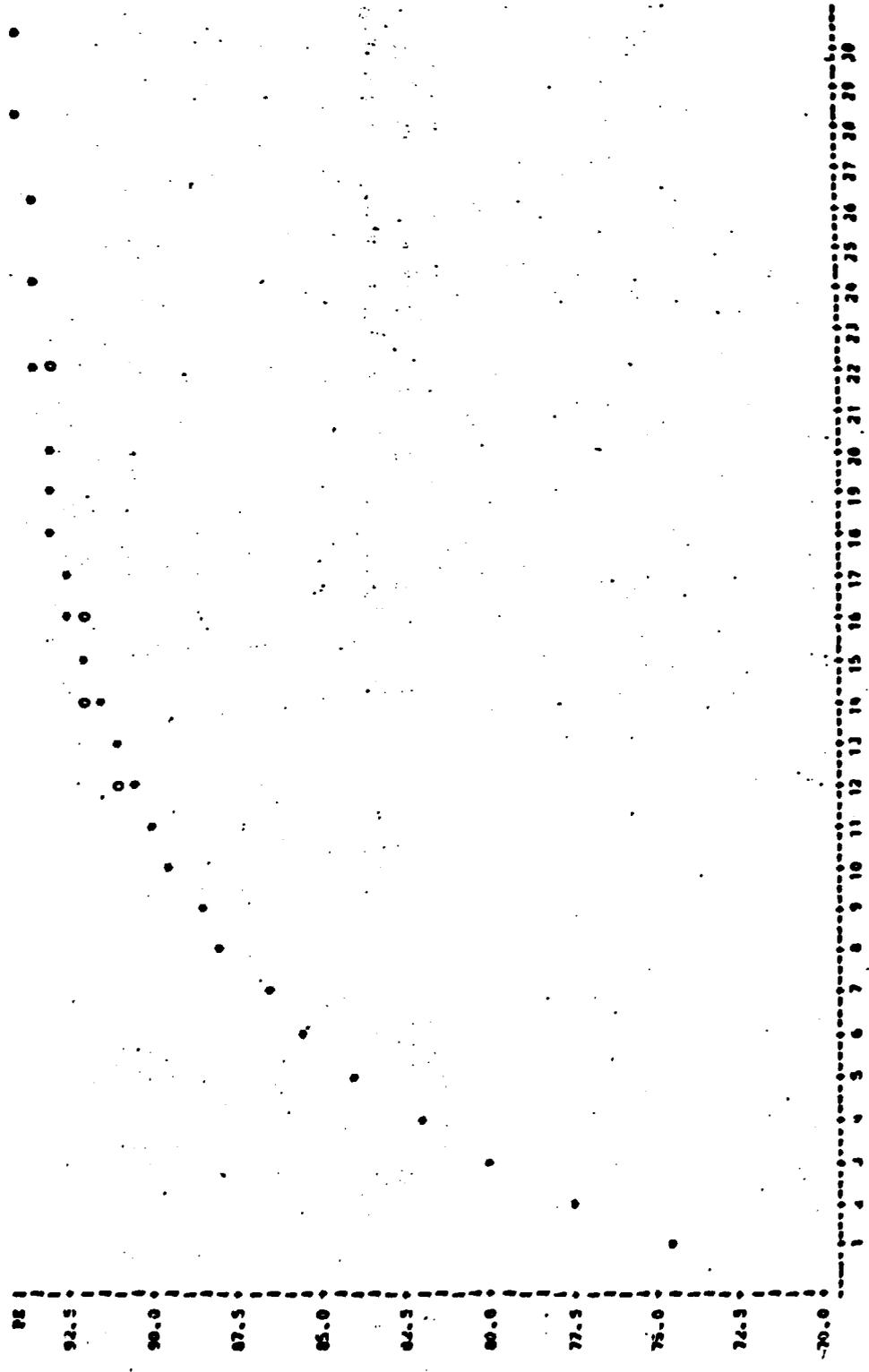
	A1	B1
A1	1.000000	0.766103
B1	0.766103	1.000000

ASYMPTOTIC STATISTICS ARE APPROXIMATE. REFERENCE: RALSTON AND JENNRICH, TECHNOMETRICS, FEBRUARY 1978, P 7-14.

SAS

OBS	X	Y	PE	RE
1	1	74.5	74.5690	-0.06900
2	2	77.5	77.4837	0.01626
3	3	80.0	79.9613	0.03875
4	4	82.0	82.0671	-0.06713
5	5	84.0	83.8571	0.14289
6	6	85.5	85.3786	0.12141
7	7	86.5	86.6718	-0.17184
8	8	88.0	87.7711	0.22891
9	9	88.5	88.7055	-0.20546
10	10	89.5	89.4997	0.00034
11	11	90.0	90.1747	-0.17473
12	12	91.0	90.7485	0.25146
13	13	91.0	91.2363	-0.23627
14	14	92.0	91.6508	0.34916
15	15	92.0	92.0032	-0.00323
16	16	92.0	92.3028	-0.30275
17	17	92.5	92.5573	-0.05735
18	18	93.0	92.7738	0.22625
19	19	93.0	92.9577	0.04231
20	20	93.0	93.1140	-0.11404
21	22	93.0	93.3599	-0.35990
22	24	93.5	93.5375	-0.03754
23	26	93.6	93.6659	-0.06587
24	28	94.0	93.7586	0.24140
25	30	94.0	93.8256	0.17441

SAS
PLOT OF W*Y SYMBOL USED IS *
PLOT OF T*Y SYMBOL USED IS O



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ADAMS, E.F. Resistance thermometry. In: CONSIDINE, D.M. ed. Process Instruments and control handbook. New York, McGrawHill, 1957. p. 2-47 - 2-59.
2. BENEDICT, R.P. Fundamentals of temperature, pressure and flow measurements. 2.ed. New York, John Wiley, 1976.
3. CARROLL, R.M. & SHEPARD, R.L. Measurement of the transient response of thermocouples and resistance thermometers using in situ method. Oak Ridge National Lab., June 1977. (ORNL-TM-4573).
4. CARROLL, R.M.; SHEPARD, R.L.; KERLIN, T.W. In situ measurements of the response time of sheathed thermocouples. Trans. Am. Nucl. Soc. , 21: 427-8, 1975.
5. CSIDER, L.J.; WHALEN, C.E.; DODGE, L.A.; CHECK, R.W. Process instrumentation. In: HARRER, J.M. & BECKERLEY, J.G. eds. Nuclear power reactor instrumentation systems handbook. Washington D.C. AEC, 1973. v.1, cap.4, p.57.
6. ECIL. Departamento de Pirometria e Diretoria Industrial. Pirometria. Piedade, São Paulo, 1984. (Catálogo comercial).
7. KERLIN, T.W. Analytical methods for interpreting in situ measurements of response times in thermocouples and resistance thermometers. Oak Ridge National Lab., Mar.

1976. (ORNL-TM-4912).

8. KERLIN, T.W. et alii. Temperature sensor response characterization. (NP-1486) apud KERLIN, T.W.; HASHEMIAN, H.M.; PETERSEN, K.M. Time response of temperature sensors. ISA Trans., 20(1):65-77, 1981.
9. KERLIN, T.W.; HASHEMIAN, H.M.; PETERSEN, K.M. Time response of temperature sensors. ISA Trans., 20(1):65-77, 1981.
10. KERLIN, T.W.; MILLER, L.F.; HASHEMIAN, H.M.; POORE, W.P. ; In situ response time testing of platinum resistance thermometers. Knoxville, Tn. Electric Power Research Institute, July 1978. v.1 (EPRI-NP-834).
11. KERLIN, T.W.; MOTT, J.E.; WARNER, D.C.; HASHEMIAN, H.M. ; ARENDT, J.S.; GENTRY, T.S.; CAIN, D.G. Progress in development of a practical method for in-situ response time testing of platinum resistance thermometers. Trans. Am. Nucl. Soc., 23:428, 1976.
12. PERIODIC testing of electric power and protection systems. Washington, D.C., US Nuclear Regulatory Commission, Nov. 1977. (Regulatory Guide 1.118).
13. SAS user's guide: statistics. Cary, North Carolina, 1982.
14. SDL (Sensing Devices Limited). Platinum resistance temperature detector. Alcom, Southport, England, 1984. (catálogo comercial).

15. UPADHAYAYA, B.R. & KERLIN, T.W. Estimation of response time characteristics of platinum resistance thermometers by the noise analysis technique. ISA Trans., 17(4)21-37, 1978.

16. UPADHAYAYA, B.R. & KERLIN, T.W. Response time testing of temperature sensors using a noise analysis method. Trans. Am. Nucl. Soc., 26:455, 1977.