

**ECAI**

Universidade Federal de Santa Catarina  
Centro Tecnológico  
Curso de Engenharia de Controle e  
Automação Industrial

**UFSC**

***Medição de Temperatura  
para Determinação de Rendimento de  
Bombas Hidráulicas***

Monografia submetida à Universidade Federal de Santa Catarina  
como requisito para a aprovação da disciplina:  
**EEL 5901: Projeto de Fim de Curso**

Alexandre Moraes Barp

Florianópolis, Fevereiro de 1997

***Medição de Temperatura  
para Determinação de Rendimento de Bombas  
Hidráulicas***

***Alexandre Moraes Barp***

Esta monografia foi julgada no contexto da disciplina  
**EEL 5901: Projeto de Fim de Curso**  
e aprovação na sua forma final pelo  
**Curso de Engenharia de Controle e Automação Industrial**

Banca Examinadora:

Steve Barrett  
Orientador da Empresa

Prof. Augusto Humberto Bruciapaglia  
Orientador do Curso

Prof. Augusto Humberto Bruciapaglia  
Responsável pela disciplina e Coordenador do Curso

Prof. Vitor Juliano de Negri  
Avaliador

Ivana Fontanive Capanema  
Debatedora

Silênio Sulivan Quarti  
Debatedor

## RESUMO

Neste Trabalho descrevem-se as atividades desenvolvidas para o projeto, implementação e testes de um termômetro eletrônico de alta precisão para incorporação em um equipamento utilizado para a determinação de rendimento de bombas hidráulicas através de princípios termodinâmicos.

O termômetro utiliza termorresistor de Platina (Pt1000) como elemento sensor e um circuito eletrônico que converte sinais dos sensores em valores proporcionais à temperatura absoluta e à diferença de temperatura entre os dois termômetros. Um software converte estes valores em temperatura e em conjunto com a medição de pressão, energia aplicada e características do fluido, calcula os valores de eficiência e vazão da bomba em funcionamento no campo.

Uma grande quantidade de experimentos foram realizados, visando a determinação do funcionamento do sensor. Os principais testes de medição foram: Calibração do sensor em baixa e alta temperatura, determinação da temperatura de mistura de água e gelo e ponto de ebulição da água, teste de determinação de rendimento em laboratório e indústria. Resultados e conclusões de uso deste tipo de sensor em medição de temperatura pode ser utilizado para a medição de rendimento de bombas.

## ABSTRACT

This report describes the activities for developing, implementing and testing of an electronic system to be integrated in to a equipment used to determine pump efficiency using thermodynamic principles.

The proposed system uses an electronic circuit to convert the Platinum Resistance Thermometer (Pt1000) signal in to a value proportional to absolute temperature and the difference of the temperatures between the probes. A computer program was written to use the temperature values along with values for the pressure, power, and the pump characteristics to calculate values for pump efficiency and hence pump flow.

For determining the characteristics of the system, The main experiments were: low and high temperature calibration, triple point and boiling point of water, efficiency test on site and laboratory. The results had shown the applicability of this kind of sensor unity to measure pump efficiency.

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>6</b>
<hr/>	
<b>2. MEDIÇÃO DE EFICIÊNCIA DE BOMBAS HIDRÁULICAS</b>	<b>9</b>
<b>2.1 - INTRODUÇÃO</b>	<b>9</b>
<b>2.2 - UM BREVE HISTÓRICO</b>	<b>9</b>
<b>2.3 - BOMBAS HIDRÁULICAS</b>	<b>10</b>
2.3.1 - DEFINIÇÕES IMPORTANTES	11
<b>2.4 - DETERMINAÇÃO DE RENDIMENTO DE BOMBAS HIDRÁULICAS</b>	<b>13</b>
2.4.1 - PROCESSO TRADICIONAL	13
2.4.2 - PROCESSO TERMODINÂMICO	15
2.4.3 - COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS	18
<b>2.5 - CONCLUSÃO</b>	<b>20</b>
<b>3. MEDIÇÃO DE TEMPERATURA E INSTRUMENTAÇÃO ELETRÔNICA</b>	<b>21</b>
<hr/>	
<b>3.1 - INTRODUÇÃO</b>	<b>21</b>
<b>3.2 - TRANSDUTORES ELÉTRICOS PARA MEDIÇÃO DE TEMPERATURA</b>	<b>22</b>
3.2.1 - CONCEITUAÇÃO SOBRE TEMPERATURA	22
3.2.2 - TERMOPARES	24
3.2.3 - SENSORES RESISTIVOS ( RESISTANCE TEMPERATURE DETECTOR - RTD )	26
3.2.4 - TERMISTORES	28
3.2.5 - CIRCUITOS INTEGRADOS	30
3.2.6 - COMPARAÇÃO ENTRE OS TRANSDUTORES DE TEMPERATURA	30
<b>3.3 - PROCESSAMENTO DE SINAL PARA MEDIÇÃO DE TEMPERATURA</b>	<b>31</b>
3.3.1 - PONTE DE WHEATSTONE	31
3.3.2 - AMPLIFICAÇÃO	33
3.3.3 - MULTIPLEXAÇÃO	34
3.3.4 - CONVERSÃO ANALÓGICA - DIGITAL (ADC)	34
<b>3.4 - CONCLUSÃO</b>	<b>35</b>
<b>4. IMPLEMENTAÇÃO DE UM TERMÔMETRO RTD</b>	<b>36</b>
<hr/>	
<b>4.1 - INTRODUÇÃO</b>	<b>36</b>
<b>4.2 - IMPLEMENTAÇÃO DE CIRCUITOS DE MEDIÇÃO DE TEMPERATURA POR RTD</b>	<b>36</b>
4.2.1 - OUTRAS CARACTERÍSTICAS RELEVANTES SOBRE RTD	36
4.2.2 - MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA	39
<b>4.3 - MONTAGEM DO CIRCUITO E EQUIPAMENTO</b>	<b>42</b>
4.3.1 - PROJETOS DOS CIRCUITOS DE MEDIÇÃO	42
4.3.2 - IMPLEMENTAÇÃO E TESTES DA PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO	52
4.3.3 - ALTERAÇÕES NO SOFTWARE PARA OS SENSORES RTD	54
4.3.4 - MONTAGEM DO EQUIPAMENTO FINAL	56
<b>4.4 - CONCLUSÃO</b>	<b>57</b>



<b>5. RESULTADOS DE EXPERIMENTAÇÃO:</b>	<b>58</b>
<b>5.1 - INTRODUÇÃO</b>	<b>58</b>
<b>5.2 - ENSAIO DE CALIBRAÇÃO DO EQUIPAMENTO</b>	<b>58</b>
5.2.1 - CALIBRAÇÃO EM BAIXA TEMPERATURA	58
5.2.2 - CALIBRAÇÃO EM ALTA TEMPERATURA	72
<b>5.3 - TESTE DE RESPOSTA UTILIZANDO PONTOS FIXOS DE TEMPERATURA</b>	<b>80</b>
5.3.1 - PONTO DE EVAPORAÇÃO DA ÁGUA	80
5.3.2 - PONTO TRIPLO DA ÁGUA	82
<b>5.4 - CALIBRAÇÃO DE TEMPERATURA DIFERENCIAL ATRAVÉS DO CALORÍMETRO DE ESTRANGULAMENTO</b>	<b>84</b>
5.4.1 - UTILIZAÇÃO DA VÁLVULA COMO CALORÍMETRO DE ESTRANGULAMENTO	85
<b>5.5 - TESTE DE FUNCIONAMENTO EM BAIXA TEMPERATURA</b>	<b>90</b>
<b>5.6 - TESTE DE FUNCIONAMENTO EM ALTA TEMPERATURA ( 'ON SITE' )</b>	<b>95</b>
<b>5.7 - CONCLUSÃO:</b>	<b>101</b>
<b>6. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS:</b>	<b>102</b>
<b>7. BIBLIOGRAFIA:</b>	<b>104</b>

## 1. Introdução

Nos dias atuais, com as ameaças de escassez e encarecimento de energia, as indústrias tem redobrado os seus esforços para evitar desperdícios e aumentar o rendimento de seus sistemas. Sistemas que antes trabalhavam sem acompanhamento, agora necessitam de constante supervisão. A determinação de ponto ótimo de funcionamento, onde perdas de energia são minimizadas, é mais do que necessária para medir o desempenho do processo.

Uma das importantes fontes de desperdício de energia está localizada em estações de tratamento de água, onde bombas são uma vital parte da instalação. Geralmente as bombas para estas aplicações, são de grande porte e funcionam de forma contínua, 24 horas por dia. Sob condições de projeto, estes equipamentos possuem rendimento na faixa de 70 a 80%. Entretanto, a degradação de funcionamento da bomba, como por desgaste ou envelhecimento de peças, provoca o decréscimo dos valores de projeto e, em consequência, o desperdício de parte da energia entregue a esta. Para se ter uma idéia, um aumento de 1% no rendimento de bombas, utilizadas em UK, pode gerar uma economia de 20 milhões de libras por ano.

Se for analisado o uso em indústrias e estações de geração de energia, a situação se torna ainda mais crítica. Na indústria, as bombas são empregadas para refrigeração de fornos, transferência de fluidos sob diversas condições de temperatura e pressão, geração de jato sob alta pressão para refrigeração e, com muita frequência, utilizando fluidos com impurezas decorrentes da captação ou por entrada de substâncias estranhas no sistema. Todos estes fatores fazem o sistema sair rapidamente do ponto ótimo de funcionamento projetado.

No caso de estações de energia, é necessário realizar a monitoração do sistema sem parada do processo. Por outro lado, as altas temperaturas e pressões são agravantes que impedem a utilização de muitas das técnicas de medição convencionais.

Para a determinação do rendimento, existem basicamente duas técnicas que podem ser utilizadas: medição tradicional ou medição por processo termodinâmico. Ambos métodos baseiam-se na medição da razão de energia cedida e aplicada ao processo, porém, utilizam diferentes variáveis para a determinação das mesmas.

O Método Tradicional baseia-se na medição de potência, pressão manométrica (Head) e vazão. A principal dificuldade está na medição da vazão com precisão suficiente para assegurar um erro mínimo na determinação do valor de eficiência. Outro fator desfavorável



está na aplicabilidade do método, uma vez que se torna difícil e/ou demorada a instalação dos instrumentos necessários.

O Método Termodinâmico utiliza como variáveis: a pressão, a energia e a temperatura absoluta e diferencial entre entrada e saída. É nesta última variável que se encontra o problema do método, uma vez que se necessita de medição com incertezas da ordem dos milésimos de graus Celsius. Entretanto, existem métodos que permitem a medição de temperatura nesta faixa incerteza e, desta forma, obtendo erros equiparados com o método tradicional.

No mercado existe a empresa Advanced Energy Monitoring System Ltd. (AEMS Ltd.), que fabrica o equipamento denominado Yatesmeter, cujo o qual possibilita a medição de eficiência pelo método termodinâmico. Porém, o mencionado equipamento, não permite a medição em bombas com funcionamento em alta temperatura, pois os sensores atualmente utilizados não permitem esta faixa de medição. Este então foi o problema proposto para o desenvolvimento deste projeto.

Este trabalho tem por objetivos: o projeto e a implementação de um sistema de medição de temperatura absoluta (acima de 200°C e incerteza de 0.1°C) e diferencial (até 5°C com incerteza de 10mK) para a viabilização da medição da eficiência de bombas hidráulicas com altas temperaturas de trabalho, através do uso de conceitos termodinâmicos.

Trata-se de um assunto relativamente novo - apesar de existirem projetos que atingem medição de temperatura com as especificações acima -, trata-se de uma das primeiras aplicações visando a determinação de eficiência de bombas em alta temperatura. Este projeto possibilitará à empresa entrar em um mercado composto por indústrias de geração de energia e transformação de grande porte, que não possuem sistemas de acompanhamento de bombas.

Sob o ponto de vista de Controle e Automação de Processos, a obtenção de dados (medição) de processos é uma das partes fundamentais dos processos sobre controle. Não se pode controlar se a variável de processo é indeterminada. Com os resultados deste projeto será possível realizar a medição de temperatura com a precisão exigida e, logo, poderão ser implementados sistemas de controle mais acurados. Além disso, a medição de eficiência em tempo real permite a constante monitoração do condicionamento da bomba, também conhecido como Monitoramento Preventivo. Através desta melhoria, os sistemas tornar-se-ão mais eficientes, com a conseqüente diminuição de gastos, atingindo assim um dos objetivos principais da Automação de Processos.

Para o desenvolvimento deste trabalho, realizou-se uma revisão bibliográfica visando a determinação de sensores, componentes e técnicas de medição de temperatura absoluta e diferencial. Posteriormente, selecionou-se as possíveis opções, realizou-se a montagem de protótipos, visando sua incorporação ao equipamento padrão. Após a integração, realizou-se um conjunto de ensaios de teste e calibração para comprovação do funcionamento em acordo com as especificações. No final, a partir de um estudo comparativo entre as diversas soluções determinou-se qual a melhor técnica a ser utilizada.

O trabalho é organizado da seguinte forma:

No capítulo 2 apresentam-se, de forma sucinta, as características das bombas hidráulicas e, com mais detalhes, os processos de determinação de eficiência de bombas.

No capítulo 3 caracteriza-se, de forma geral, os diversos transdutores elétricos de temperatura e expõem-se os componentes que fazem parte de uma cadeia de medição de temperatura.

No capítulo 4 aborda-se, com mais detalhes, as principais características de termorresistores de Platina e as diferentes formas de conversão de sinais para estes sensores. Expõem-se também o projeto e implementação de duas propostas para a resolução do problema.

No capítulo 5, apresenta-se o trabalho de testes e calibrações utilizadas para averiguação dos instrumentos, ressaltando os principais resultados.

No capítulo 6, colocam-se as conclusões do trabalho assim como as perspectivas para o futuro.



## 2. Medição de Eficiência de Bombas Hidráulicas

### 2.1 - Introdução

A bomba é provavelmente a mais recente forma de máquina inventada. Atualmente, é a segunda mais comumente utilizada, perdendo somente para o motor elétrico. Daí que vem toda a sua importância em processos industriais. Por este motivo, grandes esforços são realizados para se obter máximo desempenho desta máquina: novas tecnologias são descobertas e continuamente melhoradas, componentes são otimizados para o seu uso, processos de fabricação mais controlados e acurados são usados. Isto resulta em um grande desenvolvimento, criando uma grande variedade de tipos e chegando a níveis de eficiência bastante elevados [DICKENSON 95].

Entretanto, após a instalação e início de funcionamento da bomba, certos fatores provocam sua deterioração, afastando-a do ponto de máxima eficiência. Logo, a medição e o acompanhamento do sistema tornam-se necessários para evitar desperdício de energia.

Neste capítulo serão primeiramente apresentadas algumas características da bomba, geralmente utilizadas para a monitoração de seu funcionamento. Após explicar-se-ão, de forma superficial, os processos utilizados para a determinação de eficiência, enfatizando as diferenças existentes entre os mesmos.

### 2.2 - Um Breve Histórico

A técnica termodinâmica para medição de eficiência de bombas foi primeiramente proposta por Poison em 1914. Ele descobriu que aplicando a primeira lei da Termodinâmica para problemas de eficiência, a medição de perda de energia é mais precisa que a utilização da medição de performance total.

Este trabalho foi continuado na França e vários relatórios de trabalho de pesquisa foram produzidos, especialmente nos anos 20.

Contudo, o método teve um grande avanço em 1954 quando uma publicação realizada por William e Campas, de uma investigação feita para *Electricite de France*, incorporou adicional trabalho ao método. Este trabalho foi peculiar por ter sido realizado na cidade de Glasgow, onde a proximidade com a Universidade e o Laboratório Nacional de Engenharia do Reino Unido deixou algumas das principais pesquisas no método.

Esta associação produziu melhoramentos tanto no conhecimento teórico de propriedades termodinâmicas, quanto no projeto e construção de uma Ponte Resistiva de

Corrente Alternada de Alta Precisão, que permitiu medições de temperatura diferencial da ordem de milikelvin. Este trabalho foi realizado por Thom e Foord, nos anos 60.

O método ficou no campo teórico e com alta habilidade por 20 anos, com a maioria dos trabalhos práticos sendo desenvolvidos para a medição de grandes hidroelétricas, usando a técnica de amostragem manual [YATES e WILLEY 91].

Nos anos 80, com a revolução do computador e o crescimento da preocupação com o consumo de energia, abriu-se um mercado potencial para a serviços e produtos de baixo custo para a medição de eficiência de bombas.

Em 1983, a empresa AEMS - Advanced Energy Monitoring Systems Ltd. inicia suas atividades em Ottery St. Mary, Devon, UK, com o objetivo de fabricar um medidor de eficiência de bombas hidráulicas em tempo real, baseado na técnica termodinâmica, o Yatesmeter.

Desde então, as atividades da empresa foram inicialmente direcionadas para demonstrar às empresas de água e esgoto da região, a facilidade do método e a quantidade de energia desperdiçada por manter funcionando bombas ineficientes. Agora, o equipamento vem sendo refinado, buscando sua melhoria em qualidade e facilidade, com a busca de sua aplicação em outras áreas de bombeamento.

### **2.3 - Bombas Hidráulicas**

Bombas são máquinas geratrizes cuja finalidade é realizar o deslocamento de um líquido por escoamento. Por ser uma máquina geratriz, ela transforma o trabalho mecânico que recebe para o seu funcionamento em energia, que é comunicada ao líquido sob a forma de energia de pressão e cinética [ MACINTYRE 87] .

As bombas hidráulicas são classificadas em três grandes grupos principais:

- a) **Turbobombas:** são caracterizadas por possuírem um órgão rotativo dotado de pás, chamado rotor, que exerce sobre o líquido forças que resultam da aceleração que lhe imprime.
- b) **Bombas de Deslocamento Positivo:** são caracterizadas por possuírem uma ou mais câmaras, em cujo interior o movimento de um órgão propulsor comunica energia de pressão ao líquido, provocando o seus escoamento.
- c) **Bombas especiais:** Não podem ser classificadas acima. Ex.: bomba com ejetor, bomba de emulsão de ar.



Será dado maior enfoque às turbobombas, devido a sua importância e por ser este tipo de bomba utilizada em sistemas de grande porte.

### 2.3.1 - Definições Importantes

Será exposta definições importantes referentes ao trabalho de bombas que devem ser claramente entendidas para completa compreensão do processo:

#### 2.3.1.1 - Altura Manométrica (H):

É conhecida em inglês por **Head**. É definida como a diferença entre alturas representativas das pressões de saída e entrada de bomba. A determinação da altura manométrica é determinada da seguinte forma:

$$H = (z_2 - z_1) + \frac{(p_2 - p_1)}{\rho g} + \frac{U_2^2 - U_1^2}{2g} \quad (\text{m}) \quad (2-1)$$

onde:  $z_2 - z_1$  : Diferença entre cotas na descarga e sucção ( m )

$p_2 - p_1$  : Diferença de pressões existentes entre descarga e sucção ( Pa )

$U_2^2 - U_1^2$  : Diferença entre velocidades do fluido de descarga e sucção ( m/s )<sup>2</sup>

$\rho$  : Densidade específica do líquido ( kg / m<sup>3</sup> )

$g$  : Aceleração da Gravidade ( m / s<sup>2</sup> )

Conceitualmente, pode-se dizer que H é a energia transmitida pela bomba por unidade de massa.

A unidade mais utilizada para medição é o metro-de-coluna-d'água ( mca. ), onde 10,197mca compreende a 1 bar. Para simplificação, a unidade (mca) será escrita algumas vezes como (m) em muitos casos.

#### 2.3.1.2 - Fluxo ou Vazão ( Q ):

É uma grandeza que representa a quantidade de massa líquida bombeada na unidade de tempo. Representada por Q, esta é medida através de uma das várias técnicas já existentes: tubo de venturi, placa de orifício, medidor eletromagnético, por peso, volume, etc.

A escolha do método de medição da vazão depende de uma série de fatores, dentre os quais pode-se mencionar:

- a) O valor da taxa de vazão a ser medida;
- b) O tipo de teste a ser realizado;
- c) Condições práticas de instalação e circuito de layout;
- d) A incerteza de medição desejada;
- e) O custo para colocar o método em funcionamento e possível tempo de ação;

### 2.3.1.3 - Medição de Energia aplicada a bomba ( P ):

Do inglês ‘Power Shaft’, representa a energia mecânica de rotação necessária para realizar o bombeamento do fluido. Esta energia é provida de fontes elétricas ou mecânicas (vapor ou combustão) através de uma conexão, geralmente por caixas de redução, engrenagens ou polias. Possíveis considerações sobre perdas na transmissão da energia à bomba devem ser realizadas.

Existem duas formas básicas para a determinação da potência aplicada a bomba:

- **Indireta:** através da medição da potência de entrada do sistema fornecida pelo motor e pela posterior subtração das várias perdas de energia elétrica e mecânica no processo;
- **Direta:** através da determinação da velocidade e torque no eixo da bomba. Este método pode ser aplicado em qualquer tipo de unidade de acionamento;

Desta forma pode-se definir a seguinte relação ( referente ao método indireto):

$$E_S = \eta_M \cdot E_P \quad (W) \quad (2-2)$$

onde:  $E_S$  : Energia aplicada ao eixo de entrada da bomba ( W )

$E_P$  : Energia aplicada ao motor ( W )

$\eta_M$  : Eficiência do motor elétrico incluída todas as perdas



## 2.4 - Determinação de Rendimento de Bombas Hidráulicas

Os procedimentos para a determinação de rendimento de bombas centrífugas e bombas axiais são definidos de acordo com o tipo de aplicação, por um conjunto de três normas internacionais:

- ISO 5168 - BS 5316 Parte 3 - Classe A - Teste de laboratório
- ISO 3555 - BS 5316 Parte 2 - Classe B - Teste em grandes bombas hidráulicas
- ISO 2548 - BS 5316 Parte 1 - Classe C - Teste de trabalho nas demais bombas

Estas normas diferenciam-se entre si pelos diferentes níveis de incerteza de medição para o teste.

A tabela ilustra os diferentes níveis de incerteza exigidos para diversas medições.

<i>Medição</i>	<i>Classe A</i>	<i>Classe B</i>	<i>Classe C</i>
	<i>%</i>	<i>%</i>	<i>%</i>
<i>Taxa de Vazão</i>	<i>1.5</i>	<i>2.0</i>	<i>3.5</i>
<i>Altura de Elevação (Head)</i>	<i>1.5</i>	<i>1.5</i>	<i>3.5</i>
<i>Energia de entrada da Bomba</i>	<i>1.0</i>	<i>1.5</i>	<i>3.5</i>
<i>Energia de entrada do Motor</i>	<i>1.0</i>	<i>1.5</i>	<i>3.5</i>
<i>Velocidade de Rotação</i>	<i>0.2</i>	<i>0.5</i>	<i>2.0</i>
<i>Eficiência Total</i>	<i>2.0</i>	<i>2.5</i>	<i>4.5</i>
<i>Eficiência da Bomba</i>	<i>2.25</i>	<i>2.8</i>	<i>5.0</i>

Pode-se verificar desta tabela que os testes de classe C, destinados à medição de bombas de médio e baixo porte, terá uma incerteza de medição de 5% ao final do teste, valor que pode ser elevado para uma tomada de decisão.

Considerando estas normas, dois processos podem ser utilizados para a realização dos ensaios de bombas hidráulicas:

- Processo Tradicional;
- Processo Termodinâmico.

### 2.4.1 - Processo Tradicional

O processo tradicional ou convencional utilizado para a medição de eficiência de bombas hidráulicas é determinado através da medição de energia cedida pela bomba para

deslocamento do fluido de trabalho e da determinação da energia aplicada ao conjunto para realização deste trabalho na unidade de tempo. Expressando matematicamente, o rendimento ( $\eta_P$ ) pode-se ser expresso de acordo com a equação 2.3 [MACINTYRE 87]

$$\eta_P = \frac{M_P}{E_S} \quad (2-3)$$

onde:  $M_P$  - Potência exercida pela bomba ( W )

$E_S$  - Potência aplicada à bomba ( W )

A Potência de Saída ( $M_P$ ) exercida pela bomba pode ser expressa por:

$$M_P = \rho g Q H \quad (W) \quad (2-4)$$

onde:  $\rho$  : Massa específica do líquido ( kg/m<sup>3</sup> )

$g$  : Aceleração da gravidade ( m/s<sup>2</sup> )

$Q$  : Vazão de fluido ( m<sup>3</sup>/s )

$H$  : Altura Manométrica Total ( m )

A potência aplicada à bomba ( $E_P$ ) por um motor elétrico trifásico pode ser determinada pela relação :

$$E_P = \sqrt{3} \cdot V_L I_L \cdot \cos\theta \quad (W) \quad (2-5)$$

onde:  $V_L$  - Tensão de linha ( V )

$I_L$  - Corrente de Linha ( A )

$\theta$  - Fator de Potência do Motor Elétrico ( radianos )

Levando em consideração o rendimento do motor elétrico e acoplamento ao eixo do motor ( $\eta_M$ ), o rendimento da bomba pode ser expresso por:

$$\eta_P = \frac{M_P}{E_P \cdot \eta_M} \quad (W) \quad (2-6)$$

Assim, a eficiência da bomba ( $\eta_P$ ) pode ser expressa por :

$$\eta_P = \frac{\rho g Q H}{E_P \cdot \eta_M} \quad (2-7)$$

$$\eta_P = \frac{\rho g Q H}{\eta_M \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \cos \Theta} \quad (2-8)$$

As equações finais demonstram a necessidade da medição dos seguintes parâmetros para determinação do método:

Q - Vazão

H - Altura de Elevação Total

$E_P$  - Potência Elétrica Aplicada ao Motor

O valor do parâmetro  $\eta_M$  - Eficiência do Motor Elétrico, pode ser obtido através do fabricante ou através de ensaio ou estimativa das perdas.

#### 2.4.2 - Processo Termodinâmico

Eficiência Hidráulica é a razão de duas variações em energia por unidade de massa, em termos de entalpia, energia cinética e gravitacional [The Pump Centre 95]. Desta forma, a expressão que relaciona o rendimento da bomba pelo processo termodinâmico é expressa por:

$$\eta_P = \frac{E_h}{E_m + E_x} \quad (2-9)$$

onde:  $E_h$  - a variação total de entalpia em um processo isentrópico, reversível e ideal para as condições de entrada e saída estabelecidas. ( J/kg )

$E_m$  - a variação de entalpia total em um processo de bombeamento real ( J/kg)

$E_x$  - as perdas de energia externas ( J/kg)

As perdas de energia (  $E_x$  ) são as perdas de energia existentes em engrenagens e no acoplamento entre motor e bomba, que não afetam a temperatura do fluido. Este parâmetro é estimado e incluído junto à equação do processo.

A mudança de entalpia total no processo de bombeamento ideal (  $E_h$  ) é:

$$E_h = \overline{V}_m(p_2 - p_1) + \frac{U_2^2 - U_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \quad (\text{J/kg}) \quad (2-10)$$

onde:  $\overline{V}_m$  : Volume por unidade de massa ( $\text{m}^3 / \text{kg}$ )

$p_1, p_2$  : Pressão de entrada e saída, respectivamente ( Pa )

$U_1, U_2$ : Velocidade de entrada e saída, respectivamente (m/s)

$z_1, z_2$  : Altura de elevação ( m )

A mudança de entalpia total no processo de bombeamento real (  $E_m$  ) é:

$$E_m = \overline{a}(p_2 - p_1) + \overline{C}_p(\Theta_2 - \Theta_1) + \frac{U_2^2 - U_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) + \Delta E_M \quad (\text{J/kg}) \quad (2-11)$$

onde:  $\overline{a}$  - Coeficiente isotérmico médio (  $\text{m}^3/\text{kg}$  )

$\overline{C}_p$  - Calor Específico a pressão constante (  $\text{J} / (\text{kg K})$  )

$\Theta_1, \Theta_2$  - Temperatura de entrada e saída do líquido (  $^\circ\text{C}$  )

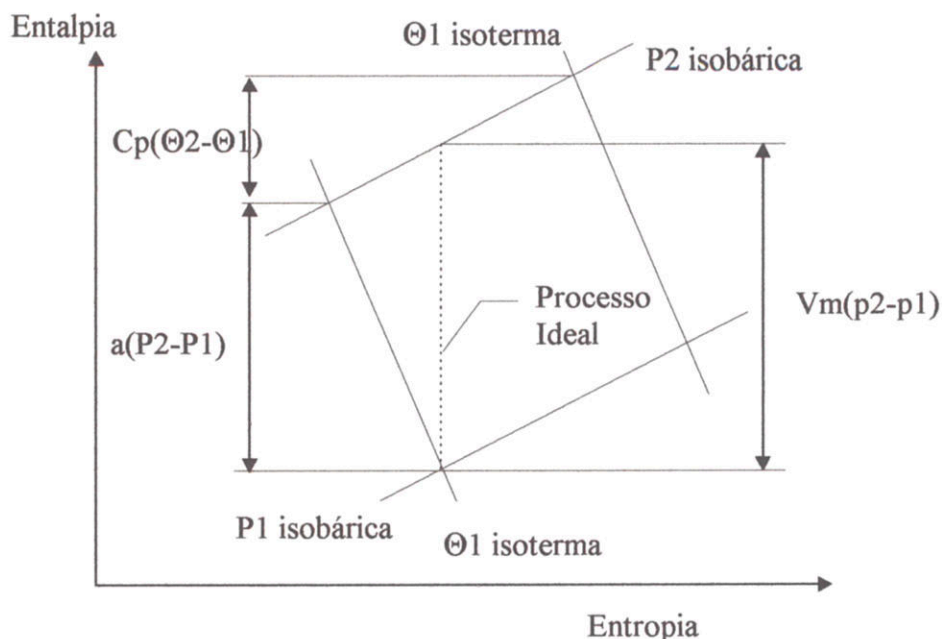
$\Delta E_M$  - perda de energia específica das paredes da bomba devido a transferência de energia.

Pela primeira lei da termodinâmica, a equação 2.11 é a energia por unidade de massa transferida para o eixo da bomba ( excluindo as perdas externas -  $E_x$  - em engrenagem ou atrito na qual não afetam a temperatura do fluido).

As perdas  $\Delta E_M$  pode ser desprezado do cálculo da eficiência, desde que a diferença de temperatura entre o fluido de trabalho e a temperatura ambiente seja pequena.

Desprezando os termos cinemáticos e gravitacionais, os dois processos podem ser traçados em um diagrama de Molier ( Entropia / Entalpia ), tendo em mente as relações termodinâmicas para substâncias puras. A Figura 2-1 expõe o diagrama do processo de bombeamento.





**Figura 2-1 - Diagrama de Molier**

O processo atual pode ser visto como um processo isotérmico entre  $(\Theta_1, P_1)$  e  $(\Theta_1, P_2)$  seguido pelo processo a pressão constante  $(\Theta_1, P_2)$  e  $(\Theta_2, P_2)$ , desde que o estado do fluido independa do caminho utilizado ao longo do processo.

Os erros que envolvem o uso dos valores médios de  $V_m$ ,  $a$  e  $C_p$ , em vez dos valores integrais ao longo do processos é mínimo para pressões entre 0 e 300 bar e temperaturas entre 0 a 150°C. Se os perfis de velocidade na posição de medição são muito diferente em relação ao perfil uniforme, o uso de velocidades médias podem ser uma fonte de erro [The Pump Centre 95].

Desta forma, utilizando o processo termodinâmico, as seguintes variáveis são necessárias para medição de eficiência ( desprezando as correções necessárias para o método):

$(P_1 - P_2)$  - Diferença de pressões entre entrada e saída da bomba;

$(\Theta_1 - \Theta_2)$  - Diferença de temperatura de entrada e saída da bomba;

$(Z_1 - Z_2)$  - Diferença de alturas entre entrada e saída;

$(U_1 - U_2)$  - Diferença de velocidades entre entrada e saída;

$\Theta_1$  e  $P_1$  - Para determinação de  $a$  e  $C_p$  obtidas em tabelas;

Tendo obtido a eficiência é possível determinar a vazão dos sistema, utilizando a fórmula de bombeamento padrão [MACINTYRE 87]:

Potência Fornecida pelo motor elétrico:

$$P_{ME} = \frac{\rho g Q H}{\eta_P \eta_M} \text{ (w)} \quad ( 2-12 )$$

e isolando a vazão, tem-se:

$$Q = \frac{P_{ME} \eta_P \eta_M}{\rho g H} \text{ (w)} \quad ( 2-13 )$$

Onde demonstra a possibilidade de determinação da vazão indiretamente.

### 2.4.3 - Comparação entre os métodos

A implementação destes dois métodos necessitam medições de diversas variáveis. As variáveis de altura manométrica e consumo de potência são utilizadas nos dois processos (considerando a medição indireta de vazão no processo termodinâmico). A diferença principal se encontra na medição de vazão e temperatura diferencial, necessárias no processo tradicional e termodinâmico, respectivamente, e que no final definirão as características existentes de cada processo.

Para deixar mais claro, a seguir será tratado de algumas características das medições comuns aos dois processos, que foram encontradas em testes de campo [YATES 81] :

#### a) *Altura Manométrica:*

A medição de altura manométrica é realizada através de transdutores de pressão instalados em registros (*taps*) colocados na sucção e na descarga da bomba.

É uma medição fácil de realizar, mas recomenda-se que o transdutor seja averiguado antes e depois da medição, no próprio local no teste.

#### b) *Potência Elétrica:*

A medição de potência elétrica é realizada através de medição simultânea de corrente tensão e potência ativa em cada linha de medição.

Para a medição de potência ativa, esta necessita de cuidados especiais na utilização de wattímetros devido aos problemas de desbalanceamento de redes trifásicas.

Para a medição de corrente, deve-se tomar cuidados com a existência de capacitores de correção do fator de potência instalados, que fazem com que os amperímetros apresentem leituras que não correspondam às correntes do motor.

Os transformadores de corrente devem ter uma classe de precisão boa, de forma a reduzir os erros na medição de potência.

Analisando-se o método tradicional, necessita-se da medição de vazão para o cálculo de eficiência de bomba. A experiência tem mostrado que testes de campo que apresentam medidas confiáveis de vazão tem sido raramente conseguidas, em virtude de alguns dados expostos a seguir :

A medição de vazão é realizada por tubo de Venturi, placa de Orifício, medidor de fluxo magnético, tubo Doll, etc. O tubo Doll tem-se mostrado nos últimos anos, uso quase que universal na medição de vazão. A precisão de um medidor de vazão é muito dependente das características de projeto e em virtude disto, consegue-se uma baixa incerteza de medição somente quando a vazão é maior que 50% do valor nominal de projeto.

Outro fator de inconfiabilidade está no fato de que um medidor é instalado para indicar a vazão de mais de uma bomba. Conseqüentemente, durante um teste de bomba, pode ter o medidor de vazão operando em uma faixa de grande incerteza de sua curva.

Dificuldades adicionais como canos retos com grande extensão, antes e depois da bomba, podem não estar disponíveis. Outro problema está no fato de o dispositivo medidor de vazão pode estar no campo por muitos anos e, por causa de sua degradação, pode se tornar não confiável.

Mesmo com estes problemas, quando o teste é levado com cuidados, pode-se atingir incertezas de medição reduzidas de eficiência das bombas. Entretanto, para que um teste possa ser executado com segurança, necessita-se pelo menos dois dias para obter os resultados esperados.

Analisando-se o método termodinâmico, nota-se que a dificuldade se encontra na determinação da temperatura diferencial com incerteza suficientemente alta. Entretanto, o desenvolvimento de sensores cada vez mais acurados tem levado a obtenção de termômetros com resolução inferior a 1mK. Existe um estudo, que mostra que um erro de 1mK na medição pode levar a 1.4 % de incerteza na medição de eficiência ( para Altura Manométrica de 50 m). [YATES e WILLEY 91]



Além deste problema, outra limitação existente na limitação do processo termodinâmico está baseada na determinação das características do fluidos de trabalho. Assim, aplicações com papel e celulose, fluidos compressíveis, óleo, misturas de fluido, etc, pode ser bastante complicada para determinar a correção necessária para medição. [LEINONEN 86]

## **2.5 - Conclusão**

Neste capítulo foi exposta os características, vantagens e desvantagem na determinação de rendimento de bombas hidráulicas por dois diferentes métodos.

O processo termodinâmico possui uma série de vantagens em relação ao processo convencional e, como resultado, bons resultados on site podem somente ser observadas pelo processo termodinâmico.

Entretanto, existem limites de utilização e, por momento, restringindo-se à água atualmente.

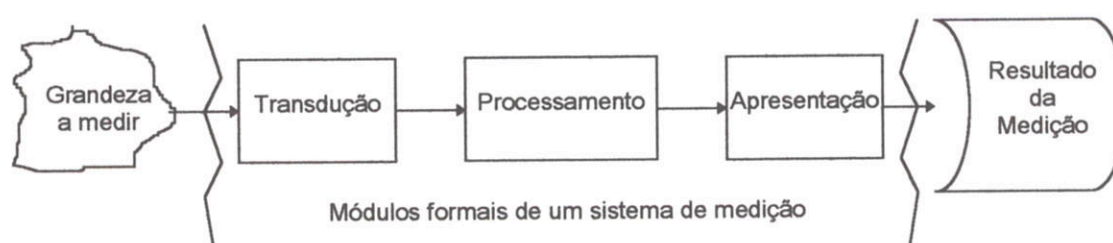


### 3. Medição de Temperatura e Instrumentação Eletrônica

#### 3.1 - Introdução

Como foi visto no capítulo anterior, deve-se realizar a medição de temperatura de precisão, se deseja-se utilizar o método termodinâmico para a determinação da eficiência da bomba.

Para o desenvolvimento de um sistema de medição, deve-se ter em mente a idéia de módulos de transformação existente em qualquer cadeia de medição. A Figura 3-1 caracteriza os blocos funcionais, independentemente da grandeza a medir.



**Figura 3-1 - Blocos Funcionais de uma cadeia de medição**

Estes blocos funcionais são classificados em três categorias [ FLESCH 95]:

**1. Módulos de Transdução:** representados pelos transdutores. Tais módulos têm a função de conversão de um sinal energético num domínio qualquer, para um sinal em um outro domínio, em geral, no domínio da energia elétrica.

**2. Módulo de Processamento:** responsáveis pelo condicionamento do sinal elétrico gerado pelo transdutor e compatibilização em termos de características elétricas de tal sinal com os do módulo de apresentação. Estão incluídos, dependendo do sistema de medição, funções como: compatibilização de impedâncias, zeragem, amplificação, modulação, demodulação, filtragem, processamentos analógicos e matemáticos entre outros.

**3. Módulos de Apresentação:** tem por função apresentar ao operador um sinal inteligível que represente momentaneamente o valor da grandeza a medir. É o caso dos indicadores e registradores, analógicos e digitais.

Assim, neste capítulo será dedicado à uma exposição dos principais transdutores para a medição de temperatura por contato e posteriormente serão apresentados os principais módulos necessários para a transformação do sinal do transdutor até a obtenção da medição.

## **3.2 - Transdutores Elétricos para Medição de Temperatura**

### **3.2.1 - Conceituação sobre temperatura**

Temperatura é uma grandeza que ocupa lugar de destaque na metrologia. De todos os tipos de transdutores utilizados, 15% são transdutores de temperatura. De fato, temperatura é uma variável fundamental na maioria das grandezas físicas, sendo que 60% dos parâmetros controlados estão associados a esta. Destes 15% totais, 70% a 80% são termopares e sensores resistivos. Com certeza, tal percentual é ainda maior no âmbito da termometria automatizada [FLESCH 95].

Do ponto de vista físico, calor é o resultado da energia contida em um corpo devido ao irregular movimento das moléculas ou átomos. Se uma bola de tênis aumenta a energia com o aumento de velocidade, um corpo ou fluido aumenta a energia interna com o aumento de temperatura. Temperatura é uma variável que juntamente com outros parâmetros como massa, calor específico, etc. descreve a energia contida no corpo [WERBER 91].

Como a temperatura não pode ser medida diretamente, foi definida uma escala internacional, baseada no comportamento de um número de materiais em pontos fixos termodinâmicos. A primeira escala praticada foi definida em 1927 com revisões diversas até a última em 1990 [FLESCH 95]. Esta última revisão, que substituiu a de 1968, foi necessária devido à grande quantidade de experiências realizadas em vários laboratórios que demonstraram falta de exatidão nas determinações prévias dos pontos fixos de temperatura [WERBER 91].

A escala internacional de temperatura de 1990 (ITS - 90) é definida de  $-272.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  até acima do ponto de solidificação da prata ( $961.78^{\circ}\text{C}$ ). Na tabela abaixo são mostrados os pontos fixos utilizados. Entre estes pontos, o termorresistor de platina (PRTD) é utilizado como elemento interpolador de referência, uma vez calibrado em determinados pontos fixos. Acima dos pontos de solidificação, a ITS-90 é definida em termos de pontos fixos e pela lei de radiação de Planck.

<b>Pontos Fixos</b>	<b>Temperatura</b>	
	<b>Kelvin ( K )</b>	<b>Graus Celsius ( °C )</b>
Ponto de Evaporação do Hélio	3 a 5	-270.15 a -268.15
Ponto triplo do hidrogênio	13.8033	-259.3467
Ponto triplo do neônio	24.5561	-248.5939
Ponto triplo do oxigênio	54.3584	-218.7916
Ponto triplo do argônio	83.8058	-189.3442
Ponto triplo do mercúrio	234.3156	-38.8344
Ponto triplo da água	273.16	0.01
Ponto de fusão do gálio	302.9146	29.7646
Ponto de solidificação do índio	429.7485	156.5985
Ponto de solidificação do estanho	505.078	231.928
Ponto de solidificação do zinco	692.677	419.527
Ponto de solidificação do alumínio	933.473	660.323
Ponto de solidificação do prata	1234.93	961.78
Ponto de solidificação do ouro	1337.33	1064.18
Ponto de solidificação do cobre	1357.77	1084.62

Existe uma grande diversidade de instrumentos que podem ser utilizados para medir temperatura. Basicamente, eles são divididos em dois grandes grupos:

- Medição por contato;
- Medição sem contato;

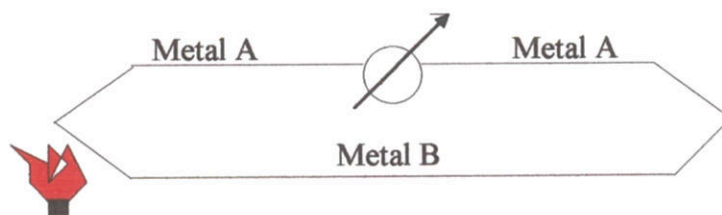
No primeiro grupo, encontram-se os termômetros de coluna de líquido, termopar, sensores resistivos e, recentemente, os sensores integrados. Com relação à medição sem contato fazem parte, basicamente, os pirômetros com suas mais variadas formas de medição.

Com exceção dos termômetros de coluna de líquido, os transdutores de contato convertem o valor da temperatura para grandezas elétricas, facilitando a aquisição automatizada de dados. Por este motivo, somente este grupo de componentes será considerado para a realização do projeto.



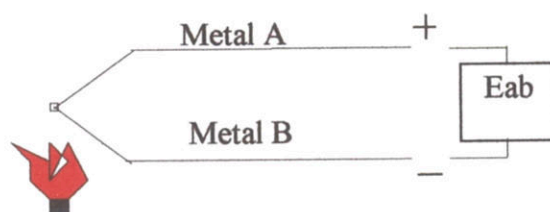
### 3.2.2 Termopares

Quando dois fios compostos por diferentes metais são ligados em ambas terminações e uma das terminações é aquecida, existirá uma diferença de potencial nos terminais do condutor denominada força eletromotriz térmica ou tensão termoelétrica. Este efeito descoberto por Thomas Seebeck em 1821, é resultante de dois fenômenos térmicos, o efeito Peltier (1834) e o Efeito de Thompson (1854).



**Figura 3-2 - Efeito Seebeck**

O primeiro se refere a liberação ou absorção de calor quando uma corrente elétrica flui através da junção de dois condutores dissimilares. A direção da corrente determina se o calor é liberado ou absorvido. Este efeito é reversível, independente da forma ou dimensão dos condutores que compõem as junções e é proporcional à diferença de corrente que flui pelas junções. O efeito de Peltier é diferente do efeito Joule. O efeito Joule não necessita de metais dissimilares e é função das dimensões do condutor, além de ser um fenômeno irreversível.



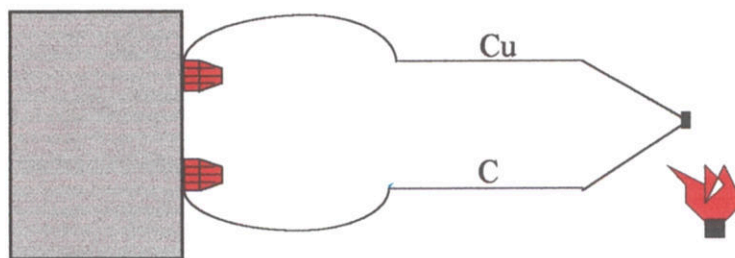
**Figura 3-3 - Tensão de Seebeck**

O segundo, efeito de Thompson, mostra que calor é liberado ou absorvido num único condutor submetido a um gradiente térmico, quando é percorrido por correntes elétricas [FLESCH 95].

Se este circuito é separado ao centro (Figura 3-3), existirá uma tensão de circuito aberto que é função da temperatura da junção e da composição dos dois metais. Esta tensão gerada, conhecida por tensão termoelétrica, na prática não pode ser diretamente

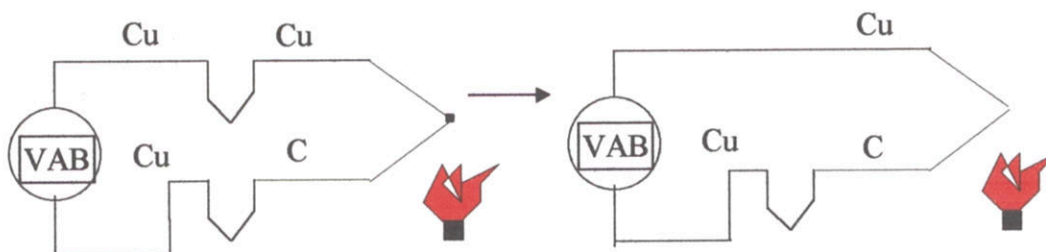


medida, uma vez que a conexão com o voltímetro implicará na criação de novas tensões termoelétrica (Figura 3-4).



**Figura 3-4 - Medição de tensão usando multímetro**

Através de uma análise do circuito formado, é possível provar que, se os bornes do voltímetro (Figura 3-5) estão na mesma temperatura, a tensão independe do material dos bornes, e depende da junção entre C-Cu e da diferença de temperatura entre a junção e os bornes do voltímetro. Isto mostra uma das características do termopar: A necessidade de utilização de uma temperatura de referência conhecida, para a medição absoluta de temperatura.



**Figura 3-5 - Diagrama representativo dos bornes**

A forma mais usual de compensação é a utilização de um banho de gelo. A esta forma de compensação é chamada de referência ou junta fria. Existe também a possibilidade de compensação através da aplicação da soma de uma tensão proporcional à temperatura de referência, provida por um circuito que incorpora um sensor de temperatura e uma fonte de corrente.

Para obter o valor de temperatura em função da tensão de saída, normalizou-se os principais tipos de sensores. Assim, um polinômio interpolador de ordem elevada pode ser utilizado.

$$T = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + a_3 \cdot x^3 + \dots + a_n \cdot x^n \quad (3-1)$$

onde: T: Temperatura

x: Tensão no termopar

$a_i$ : Coeficientes do polinômios, único para cada componente

n: Ordem máxima do polinômio.

### 3.2.3 - Sensores Resistivos ( Resistance Temperature Detector - RTD )

No mesmo ano que Seebeck fez sua descoberta sobre termoeletricidade, Sir Humphrey Davy mostra que os metais demonstram uma notável dependência a temperatura. Cinquenta anos mais tarde, Sir William Siemens propõem o uso de platina como elemento um termômetro de resistência. Sua escolha provou ser a mais propicia, uma vez que este é utilizado como elemento primário para termômetros de alta precisão.

Atualmente, o elemento sensor do termorresistor pode ser de diferentes tamanhos e formas, sendo o mais comum tipo bobina (convencional) ou tipo filme (mais utilizado com fio de platina). A principal vantagem do tipo filme é a redução do tamanho, implicando em tempo de resposta da ordem de 0.1 segundos, comparável a termopares de pequenas dimensões. Tubo de proteção de aço inoxidável, vidro e cerâmica são geralmente usados para proteger de atmosferas corrosivas, umidade e do meio no qual é inserido o transdutor [FLESCH 95].

Apesar da platina ser o metal mais utilizado, todos os metais apresentam aumento da resistência para uma mudança positiva de temperatura.

Basicamente, erros de sistemas são minimizados quando o valor nominal do RTD é grande. Isto implica em fio metálico de alta resistividade. Assim, quanto menor a resistividade, maior será a quantidade de material que deverá ser utilizada. A tabela abaixo mostra os materiais mais utilizados para RTD.

<b>Metal</b>	<b>Resistividade OMH CMF (cmf = circular mil foot)</b>
<i>Ouro - Au</i>	13.00
<i>Prata - Ag</i>	8.8
<i>Cobre - Cu</i>	9.26
<i>Platina - Pt</i>	59.00
<i>Tungstênio - W</i>	30.00
<i>Níquel - Ni</i>	36.00

Por causa de sua baixa resistividade, ouro e prata são raramente usados como RTD. O Tungstênio, apesar de uma alta resistividade e de ser extremamente frágil e difícil de trabalhar, pode ser utilizado para aplicações em muito alta temperatura.

Cobre é usado ocasionalmente como elemento RTD. Sua baixa resistividade obriga ser maior que o resistor de platina, mas sua linearidade e baixo custo possibilitam sua viabilidade econômica [OMEGA 95]. Sua faixa medição alcança somente até 120°C e é freqüentemente utilizado em indústrias de materiais elétricos, para medição de enrolamentos de dínamos, motores e transformadores [FLESCH 95].

Os mais comuns RTDs são feitos de platina, níquel e ligas de níquel. Níquel e seus derivados são usados em reduzidos limites de temperatura. Possuem uma considerável não linearidade e tendência a 'drift'. Frente a tudo isto, a Platina é de longe, o material mais utilizado. [OMEGA 95]

Platina é especialmente preparada para este propósito, uma vez que pode medir altas temperaturas enquanto mantém excelente estabilidade. Como um metal nobre, a platina mostra uma limitada susceptibilidade a contaminação.

A relação entre a temperatura e a resistência elétrica (  $R(t)$  ) geralmente não pode ser descrita linearmente, mas por polinômio de ordem superior. A relação pode ser descrita por:

$$R(t) = R_0 (1 + A.t + B.t^2 + C.t^3 + \dots) \quad (3-2)$$

onde:  $R_0$  - Resistência nominal a uma temperatura padrão (  $\Omega$  )

t - Temperatura da resistência (  $^{\circ}\text{C}$  )

A - Coeficientes de proporção de primeira ordem (  $\Omega/^{\circ}\text{C}$  )

B - Coeficientes de proporção de segunda ordem (  $\Omega/^{\circ}\text{C}^2$  )

C - Coeficientes de proporção de terceira ordem (  $\Omega/^{\circ}\text{C}^3$  )

A resistência  $R_0$  representa a resistência nominal a uma determinada temperatura. Os termos de mais alta ordem podem ser incluídos, dependendo da precisão de medição. Os coeficientes (A, B, C, ...) dependem da resistência do material.

Analisando mais detalhadamente o sensor de platina, podem ser utilizadas duas equações para a interpolação, dependendo da faixa de medição utilizada [WERBER 91]:



$$R(t) = R_0(1 + A.t + B.t^2 + C.t^3) \text{ entre } -200^\circ\text{C a } 0^\circ\text{C} \quad (3-3)$$

$$R(t) = R_0(1 + A.t + B.t^2) \text{ entre } 0^\circ\text{C até } 850^\circ\text{C} \quad (3-4)$$

onde os coeficientes ( valores padrões para Platina ) são:

$$A = 3.90802 \cdot 10^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$B = -5.802 \cdot 10^{-7} \cdot ^\circ\text{C}^{-2}$$

$$C = -4.2735 \cdot 10^{-12} \cdot ^\circ\text{C}^{-3}$$

O valor de  $R_0$  é o valor nominal de resistência a temperatura de  $0^\circ\text{C}$ . De acordo com a IEC 751 o valor nominal é definido como  $100 \Omega$ , conhecido normalmente como Pt 100. Outros valores múltiplos deste 100 podem ser encontrados como 50, 200, 400, 400, 1000 e 2000 [ OMEGA 95].

O RTD é dispositivo muito mais linear que o termopar, mas ainda necessita de curva de ajuste para a determinação da resistência. A equação de Callendar Van-Dusen tem sido usada por anos para aproximar a curva do RTD:

$$R(t) = R_0 + R_0 \cdot \alpha \left[ T - \delta \left( \frac{T}{100} - 1 \right) \left( \frac{T}{100} \right) - \beta \left( \frac{T}{100} - 1 \right) \left( \frac{T^3}{100} \right) \right] (\text{Ohm}) \quad (3-5)$$

onde:  $R(t)$  - Resistência a temperatura  $T$

$R_0$  - Resistência a  $T = 0^\circ\text{C}$

$\alpha$  - Coeficiente de temperatura a  $T = 0^\circ\text{C}$  ( tipicamente  $+0.00392 \Omega/\Omega^\circ\text{C}$

$\delta = 1.49$  ( valor típico para platina pura )

$\beta = 0$ ;  $T > 0$

$0.11$ ;  $T < 0$  ( Típico )

Os exatos valores para os coeficientes  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\delta$ , são determinados por teste do RTD em 4 temperaturas e através da resolução das equações.

### 3.2.4 - Termistores

Como o RTD, o termistor também é um resistor sensível a temperatura. Enquanto o Termopar é o mais versátil transdutor de temperatura e o PRTD é o mais estável, o termistor

é o componente com a maior sensibilidade. Sua resistência a 25°C pode apresentar valores desde 500 Ω até MegaOhms para diferentes termistores.

São geralmente compostos por materiais semicondutores, podendo ter coeficientes de temperatura positivos (PTC) e negativos (NTC). Entretanto são os NTC que são os mais comumente utilizados na termometria. São compostos por uma mistura de óxidos de níquel, manganês com adição de outros metais, e sinterizados a uma temperatura acima de 1000°C [FLESCH 95].

Apresentam uma alta não linearidade, com uma dependência dos parâmetros do processo de fabricação dos mesmo. Conseqüentemente, não existem padrões de referência para componentes de diferentes fabricantes, tal como ocorre com termopares e RTD.

Um termistor individual pode ser aproximado pela equação de Steinhart-Hart [OMEGA95] :

$$\frac{1}{T} = A + B \cdot \ln(R) + C \cdot (\ln(R))^3 \quad (3-6)$$

onde: T - Temperatura (Kelvin)

R - Resistência do Termistor ( Ohm )

A,B,C - Constantes de Ajuste de Curva

A, B, C são encontrados pela seleção de três pontos resistência/temperatura [(R1,T1), (R2,T2), (R3,T3)] e resolvendo as três equações simultaneamente. Quando os pontos são escolhidos com alcances inferiores a 100 °C e com um ponto no centro nominal do alcance desejado, esta equação pode aproximar para até ± 0.02°C de erro de linearidade.

A alta resistividade do termistor permite que se dispense a medição a 4-fios, necessários no RTD, uma vez que o erro introduzido pela resistência dos fios é menor que 0.05°C.

Por outro lado, os termistores são geralmente limitados a poucas centenas graus Celsius e quando expostos a seus limites máximos de operação, podem ocorrer desvios em seus valores de tolerâncias.

Os termistores são pequenos e podem responder rapidamente a mudanças de temperatura, entretanto sua pequena massa os torna mais susceptíveis a erros de auto aquecimento.

Utilizando um computador, a não linearidade pode ser compensada através da equação:

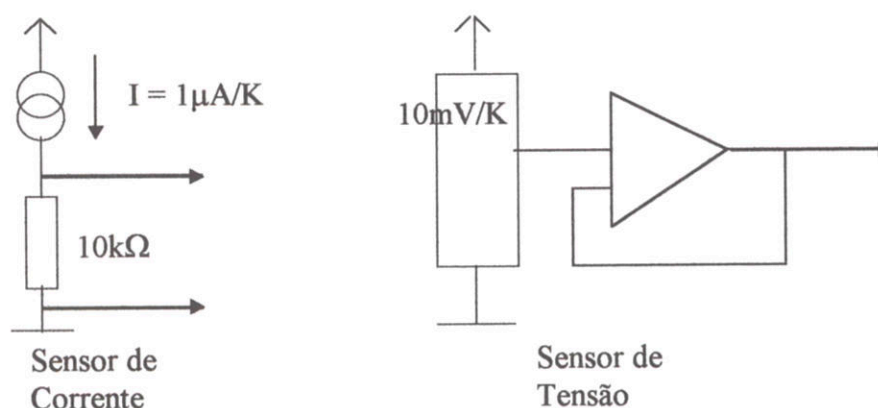
$$T = \frac{B}{\ln(R)} - C \quad (\text{K}) \quad (3-7)$$

Esta equação pode ser aplicada sobre uma faixa estreita de medição, de forma a manter a precisão do sistema.

### 3.2.5 - Circuitos Integrados

A mais recente inovação em termometria é o transdutor de temperatura por circuito integrado, disponível tanto como fonte de tensão quanto como fonte de corrente. Ambos possuem sinal de saída proporcional à temperatura absoluta com valores típicos de  $1 \mu\text{A/K}$  e  $10 \text{ mV/K}$ .

A utilização deste amplificador é bastante simples, não precisando instrumentação muito avançada para converter o sinal. A Figura 3-6. mostra um exemplo típico de uso.



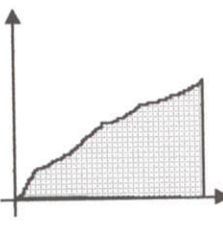
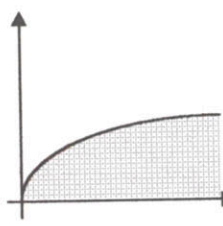
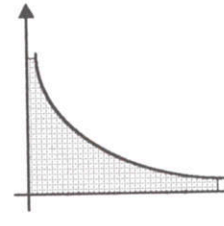
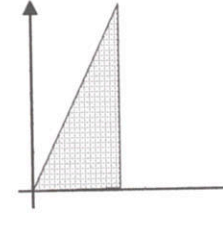
**Figura 3-6 - Circuito Integrado**

Ele possui a melhor linearidade entre todos os sensores e preço reduzido. Entretanto este componente possui a desvantagem de apresentar problemas de auto aquecimento. É frágil e exige cuidados especiais na utilização e construção. O componente também requer o uso de fonte de alimentação externa e possui amplitude geralmente limitada até  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  [OMEGA 95].

### 3.2.6 - Comparação entre os transdutores de temperatura

A tabela abaixo ilustra a diferenciação entre os métodos de medição expostos.



	<b>Termopar</b>	<b>RTD</b>	<b>Termistor</b>	<b>Sensor C.I.</b>
				
<b>VANTAGENS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Auto-alimentado</li> <li>• Simples</li> <li>• Robusto</li> <li>• Baixo Custo</li> <li>• Grande Variedade</li> <li>• Grande Alcance de temperatura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mais estável</li> <li>• Mais acurado</li> <li>• Mais linear que termopar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grande magnitude de sinal de saída</li> <li>• Rápido</li> <li>• Medição em dois fios</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maior Linearidade</li> <li>• Maior valor de saída</li> <li>• Baixo custo</li> </ul>
<b>DESvantagens</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Não linear</li> <li>• Baixa Tensão</li> <li>• Necessidade de Referência</li> <li>• Menos estável</li> <li>• Menos sensível</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alto custo</li> <li>• Necessidade de fonte de corrente</li> <li>• Pequeno <math>\Delta R</math></li> <li>• Baixa resistência absoluta</li> <li>• Auto-aquecimento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Não linear</li> <li>• Faixa de Operação limitada</li> <li>• Frágil</li> <li>• Necessidade de fonte de corrente</li> <li>• Auto-aquecimento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alcance menor que 200°C</li> <li>• Necessidade de alimentação</li> <li>• Lento</li> <li>• Auto-Aquecimento</li> <li>• Configuração Limitada</li> </ul>

### 3.3 Processamento de sinal para medição de temperatura

#### 3.3.1 - Ponte de Wheatstone

O circuito de Ponte é um dispositivo largamente empregado para medidas de resistência, capacitância e indutância. A ponte resistiva é uma das mais largamente utilizadas. A Figura 3-7 ilustra a forma mais simples de uma ponte puramente resistiva com uma tensão de excitação que pode ser AC ou DC.

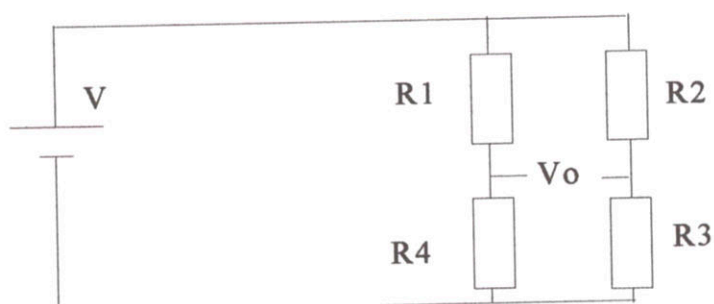


Figura 3-7 - Ponte de Wheatstone

O princípio básico da ponte pode ser aplicado por dois métodos diferentes:

- i) o método da tensão nula;
- ii) o método da deflexão.

O Método da tensão nula :

Neste método a ponte possui um resistor ajustável manualmente, então se uma variação em um dos resistores ocorrer, provocando uma deflexão no medidor, é possível alterarmos o valor do resistor ajustável de modo a voltarmos a ter tensão zero, e portanto valor nulo. Neste caso o valor numérico da mudança do resistor ajustável está relacionado diretamente para a mudança provocada no outro resistor necessário para efeito de estabilidade do sistema.

O Método da deflexão:

Neste, como no outro a ponte sempre deve estar balanceada, quando algo provoca a mudança de um dos resistores, isto provocará o aparecimento de uma tensão medida pelo voltímetro, provocando uma “deflexão” no aparelho, daí o nome do método, a qual pode ser utilizado para computar a mudança

A escolha de um método ou de outro é dependente da aplicação, já que ambos tem utilização prática.

O método da deflexão apresenta um tempo resposta mais rápido, porque a variação da resistência provoca automaticamente o aparecimento de uma tensão nos terminais do medidor ou de um osciloscópio, então medidas de fenômenos dinâmicos são possíveis, o que é uma dificuldade para o da tensão nula já que é necessário um tempo, mesmo que pequeno se pensarmos em um sistema com servo-mecanismo, para executar o ajuste do resistor automaticamente.

A questão da sensibilidade da ponte é considerada para caso onde o “medidor” tem uma alta resistência interna, comparada com a resistência da ponte. As quais geralmente possuem amplificadores com  $1M\Omega$  ou mais de resistência. Esta sensibilidade está no fato de existir uma linearidade ou não entre a variação da resistência sob teste e a tensão medida no medidor.

É possível mostrar através do modelo qualitativo que se a resistência interna é alta o suficiente, então podemos pensar como um circuito aberto os terminais AC onde são realizadas as medições.

Usando o teorema de Thévenin pode-se decidir se o valor de resistência interna é adequado ou não à utilização do método quantitativo.

### 3.3.2 - Amplificação

O amplificador tem por função básica amplificar um sinal. Para aplicação em instrumentação elétrica de medição, o amplificador mais importante é o amplificador de tensão. A relação entre a tensão de saída ( $V_s$ ) e de entrada ( $V_e$ ) de um amplificador de tensão é chamada de “ganho de tensão” do amplificador.

A utilização dos amplificadores em instrumentação requer que seja facilmente ajustável este ganho pelo usuário, e ele se torne um elemento compatibilizador da grande gama de sinais de saída de diferentes transdutores, com diferentes indicadores, registradores e conversores analógicos-digitais empregados.

A principal característica dos amplificadores é receber tensões provenientes de transdutores com as mais diferentes sensibilidades e operando nas mais diversas faixas de operação e compatibilizá-los em uma mesma faixa de tensão de saída.

Outra característica importante do amplificador de tensão usado em instrumentação é a sua impedância de entrada, que deve ser a mais alta possível para minimizar-se os efeitos de retroação do amplificador sobre o transdutor.

#### 3.3.2.1 O Amplificador Diferencial

O amplificador mais usado em instrumentação é o do tipo “diferencial”, isto é, ele amplifica a diferença entre as duas tensões de entrada. Com isto tem-se as seguintes definições.

Tensão diferencial: ( $V_d$ ) é a diferença de tensão entre as duas entradas do amplificador.

Tensão de modo comum ( $V_{mc}$ ) é o valor médio das tensões nas entradas do amplificador.

O amplificador conhecido como amplificador de instrumentação, nome freqüentemente encontrado na literatura técnica pertinente, é um amplificador diferencial que tem como características desejáveis: alta impedância de entrada, boa simetria, com conseqüente alta RRMC (razão de rejeição de modo comum), e ganho facilmente ajustável. A impedância de entrada de tais amplificadores está na faixa de centenas de  $M\Omega$  ou até  $G\Omega$ . A razão de rejeição de modo comum pode, a primeira vista, parecer alta, estando normalmente na faixa



de 80 a 120 dB, na prática se mostra como característica extremamente crítica já que as tensões de modo comum podem ser até milhares de vezes maior do que as tensões diferenciais.

### **3.3.3 - Multiplexação**

De funcionamento bastante simples, o multiplexador tem a função de permitir que uma série de sinais possam trafegar em um único canal. Este tipo de problema ocorre exatamente quando uma grande quantidade de sinais de medição necessitam ser convertidos para digital.

Existem dois tipos básicos de componentes deste tipo:

- Relé
- Chave Semicondutoras

O Relé é um componente eletromecânico que uma vez excitado por uma corrente elétrica em seu núcleo, fecha (ou abre, dependendo do tipo), seus contatos. São lentos, devido a inércia mecânica própria de sua construção e, geralmente, são bastante ruidosos. Possui a vantagem de ter uma baixa resistência de contato, de forma que não existe muita perda de sinal.

As chaves semicondutoras, mais modernas, são compostas por transistores e, da mesma forma que o Rele, fecham ( ou abrem) os contatos de acordo com um sinal de comando. Por ser um componente integrado, este ocupa pouco espaço em placa, são silenciosos e não possuem problemas de desgaste. Alguns componentes podem apresentar uma considerável corrente de contato, de forma a colocar erros nos sinais de medição, mas o desenvolvimento desta técnica cria componentes cada vez mais precisos.

### **3.3.4 - Conversão Analógica - Digital (ADC)**

Os conversores Analógico - Digitais, como o próprio nome indica, transformam sinais analógicos em sinais digitais, próprios para serem processados por sistemas digitais. Existe uma grande quantidade de tipos de conversores digitais que podem ser utilizados, entretanto dois tipos se destacam sobre os demais:

- Conversores sucessivos por aproximação;
- Integrador (Dual Slope);

O ADC Integrador é superior em qualquer característica: linearidade, precisão, resolução, mas tem o problema da velocidade de trabalho. Neste tipo de aplicação onde a velocidade torna-se importante, os conversores por aproximação possuem vantagem.

O número de bits da informação digital também é elemento determinante da resolução e da velocidade de conversão. O número de bits relaciona a resolução ( incremento digital ) com a faixa de operação ( analógica) através da equação:

$$ID = \frac{FM}{2^n} \quad (3-8)$$

onde: ID - Incremento digital ou resolução do sistema de medição

FM - Faixa de operação

n - Número de bits

Por exemplo, um conversor de 12 bits possui uma resolução (ID) de 1/4096 da faixa de medição.

Existem certos tipos de ADC que fornecem sua resolução na forma de dígitos. Assim, um ADC que tenha 4.5 dígitos, pode medir até 0.1mV, para uma tensão de referência de 1V.

### **3.4 - Conclusão**

Uma cadeia de medição, qualquer que seja esta, possui os blocos básicos como ilustrado anteriormente. Assim, dependendo da aplicação torna-se possível intercambiar blocos existentes por outros.

Existe uma grande quantidade de transdutores para medição de temperatura. Sua utilização depende do tipo de aplicação que deseja-se, sendo sempre um mais próprio que outros. Entretanto, é possível obter mesmas soluções com sensores diferenciados, como era de se esperar.

Existe uma grande quantidade de componentes eletrônicos que são utilizados para a transformação dos sinais. O projetista deve ter em mente todos estes componentes e parâmetros, de forma que seja possível obter os resultados que se espera.



## 4. Implementação de um termômetro RTD

### 4.1 - Introdução

A pesquisa sobre sensores de medição de temperatura indicou que os sensores integrados, apesar da facilidade de utilização e de já serem utilizados pelo atual Yatesmeter, não permitem a medição em alta temperatura (acima de 150°C). Os termopares, apesar de serem amplamente utilizados e especialmente desenvolvidos para medição diferencial de temperatura, possuem problemas de instabilidade, não-linearidade e calibração que impedem sua utilização para esta aplicação. A escolha recai, então, sobre os sensores resistivos: PRTD e termistores.

Os PRTD possuem características de estabilidade e linearidade a seu favor, entretanto a sensibilidade e a relativa estabilidade dos termistores tornam a segunda opção viável. Desta forma, a empresa decidiu investigar as duas possibilidades de medição de temperatura, através da contratação de um novo engenheiro em tempo parcial para o desenvolvimento do projeto com termistores. Desta forma, os trabalhos de desenvolvimento do sensor para alta temperatura focalizaram somente em Sensores Resistivos de Platina.

Neste capítulo, serão inicialmente apresentados as demais características dos Sensores Resistivos, mostrando os parâmetros necessários para sua caracterização. Posteriormente, serão apresentadas as principais técnicas para a medição de resistência, reduzindo os erros de medição. Em seguida, será apresentado o processo de projeto e construção do circuito de medição de temperatura até a sua incorporação ao equipamento.

### 4.2 - Implementação de circuitos de medição de temperatura por RTD

#### 4.2.1 - Outras Características Relevantes sobre RTD

Quando se deseja construir um circuito de medição com RTD, aspectos práticos tornam-se importantes para um cuidadoso projeto. A seguir, serão mostrados os principais pontos que influenciam na especificação final do componente [OMEGA 95]:

**1. Material do Elemento resistente:** Como exposto anteriormente, pode-se utilizar uma série de materiais como elemento sensor, sendo a escolha definida pela aplicação, sensibilidade, linearidade e estabilidade. Sem dúvida, o elemento de Platina é o mais utilizado por apresentar a melhor linearidade e estabilidade. Níquel e cobre vêm em seguida como escolhas alternativas em determinadas aplicações, onde estes tornam-se viáveis. Os



demais, como Balco (liga de Ferro-Níquel) e Tungstênio, são utilizados para aplicações especiais.

**2. Coeficiente de temperatura:** O coeficiente de temperatura de um elemento é propriedade física e elétrica do material. Este termo descreve as médias de mudanças de resistência por unidade de temperatura entre o ponto triplo e o ponto de evaporação da água. O coeficiente de temperatura ( $\alpha$ ) é definido pela equação:

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100 R_0} \text{ (}^\circ\text{C}^{-1}\text{)} \quad (4-1)$$

onde:  $R_{100}$  - Resistência a  $100^\circ\text{C}$

$R_0$  - Resistência a  $0^\circ\text{C}$

Diferentes organizações tem adotado diferentes valores padrões. Em 1983, a IEC (International Electrotechnical Commission) adotou a norma DIN (Deutsche Institute for Normung) para platina com  $R_0$  de 100 (Pt 100) a  $0^\circ\text{C}$  com o valor de  $0.00385 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ . Este padrão é agora aceito mundialmente pelas indústrias, apesar das outras unidades serem amplamente aceitas. Estes valores diferem devido a diferentes projetos e técnicas de fabricação, e variam de  $0.00392 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  (termômetros de resistência de platina padrão) a  $0.00385 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  (RTD industriais).

**3. Resistência Nominal:** é o valor de resistência nominal a uma dada temperatura. Muitos padrões (incluindo IEC-751) escolhem  $0^\circ\text{C}$  como ponto referência. O padrão IEC é o valor de 100 Ohm à  $0^\circ\text{C}$ , mas outros padrões são disponíveis.

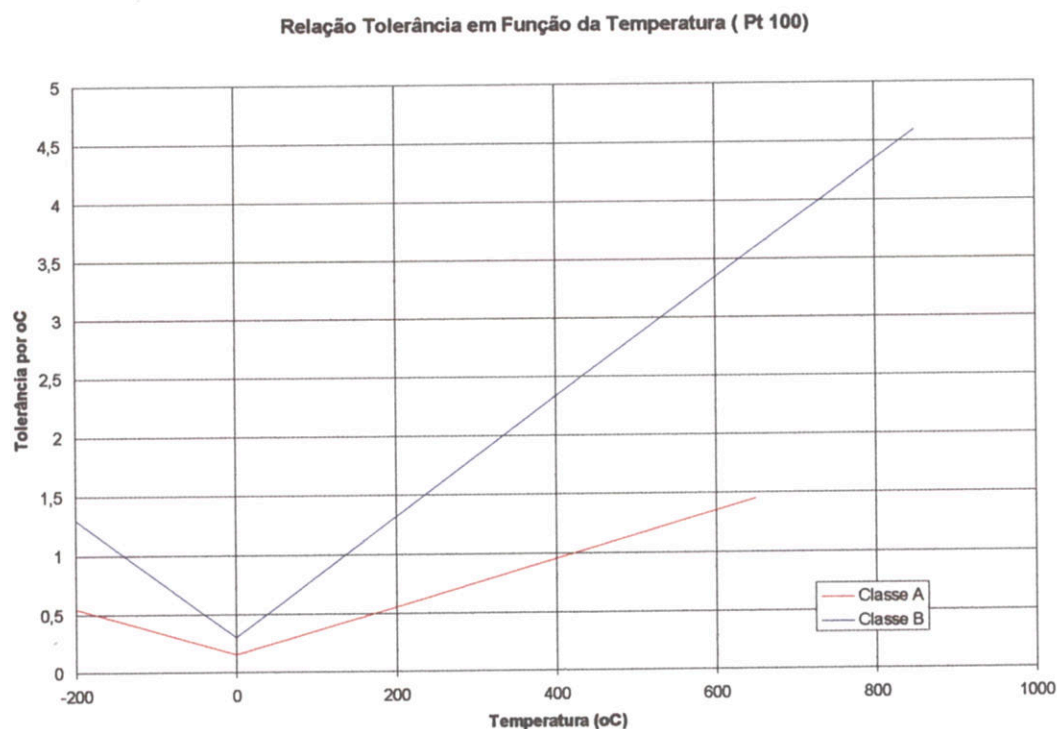
**4. Faixa Nominal de Temperatura:** Dependendo das características de manufatura e configuração mecânica, o RTD pode ser usado entre os valores de  $-270^\circ\text{C}$  a  $850^\circ\text{C}$ . Entretanto, o tipo de material utilizado (filme ou encapsulamento de filme) diminuem esta faixa.

**5. Tolerância de Erros:** Segundo a IEC 751, que adotou a norma DIN 43760, o RTD pode ser especificado em duas classes:

$$\begin{aligned} \text{Classe A : } \Delta t &= \pm (0.15 + 0.002 \cdot t) \\ \text{Classe B : } \Delta t &= \pm (0.30 + 0.005 \cdot t) \end{aligned} \quad (4-2)$$

onde:  $t$  : Módulo da Temperatura em  $^\circ\text{C}$

Os PRTD de Classe A são utilizados para temperaturas entre -200 a 650 °C e somente com medição a 3 ou 4 fios. Os PRTD classe B cobrem toda a faixa nominal.



**Figura 4-1 - Classes de Tolerância**

**6. Auto-Aquecimento:** Por ser um transdutor passivo, existe a necessidade de excitar o componente com uma corrente de teste conhecida. Como o RTD trata-se de um componente resistivo, haverá dissipação de energia (  $P$  ) que pode ser calculada pela equação 4.3:

$$P = R \cdot I^2 \text{ (W)} \quad (4-3)$$

onde:  $R$  : Resistência do RTD ( ohm )

$I$  : Corrente de teste ( A )

O grau de dissipação de energia que o sensor pode suportar é determinada pelo fabricante e seu valor é expresso pela constante de auto-aquecimento (  $E$  ). Esta constante de auto-aquecimento determina a variação ( ou erro ) na medição do valor real de temperatura por unidade de energia dissipada pelo sensor. Assim, o erro de medição ( $\Delta T$ ) pode ser estimado pela equação 4.4.

$$\Delta T = P \cdot E \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (4-4)$$

onde:  $\Delta T$  : Erro na medição de temperatura devido ao autoaquecimento

P : Potência dissipada pelo termistor ( W )

E : Constante de auto-aquecimento (  $^\circ\text{C} / \text{W}$  )

**7. Acessórios de proteção:** Geralmente em processos industriais, a utilização do componente sem qualquer forma de proteção pode levar a rápida degradação do transdutor. Desta forma, os fabricantes de componentes produzem vários modelos de acessórios para evitar estes problemas.

Basicamente, estes componentes são divididos em duas partes: Cabeçote e Tubo de Proteção (Thermowell).

Os cabeçotes têm a função de permitir ou proteger a ligação entre os componentes com os fios de medição. Estes componentes devem possuir boa resistência à corrosão, poeira, umidade e ser de fácil conexão.

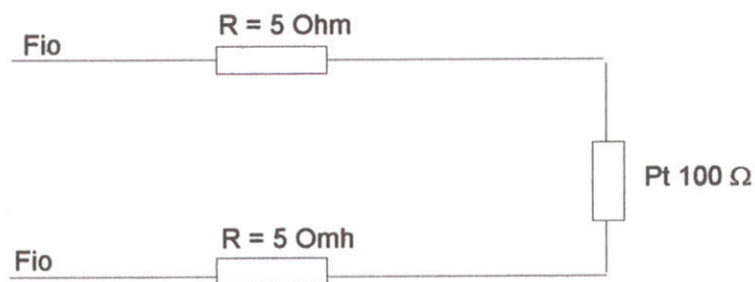
Os tubos de proteção são utilizados para evitar danificação do componente-sensor a choques mecânicos, térmicos e físicos-químicos. Este é um procedimento bastante comum quando o fluido é agressivo ( corrosivo, alta temperatura e/ou pressão).

#### 4.2.2 - Medição de Resistência

O coeficiente de temperatura padrão DIN 43760 do fio de platina é  $\alpha=0,00385 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ . Para um fio de  $100 \text{ } \Omega$  corresponde à  $0,385 \text{ } \Omega/^\circ\text{C}$  a  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ . Este valor de  $\alpha$  corresponde exatamente a inclinação média da reta entre as temperaturas de  $0^\circ\text{C}$  até  $100^\circ\text{C}$ . O fio mais puro de platina usado em resistências padrões tem  $\alpha$  no valor de  $0,00392 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ .

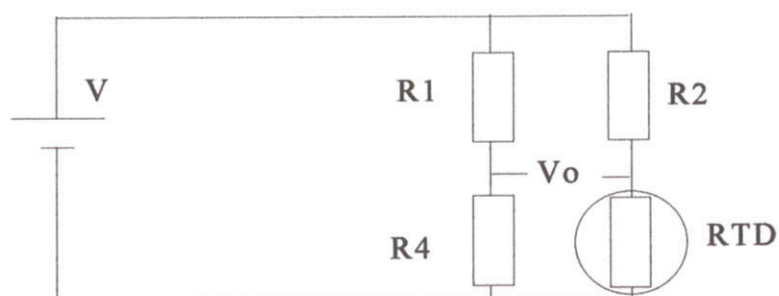
Tanto a inclinação como o valor absoluto são números muito pequenos, especialmente quando considerado o fato que uma medida de um fio condutor para um sensor pode ter dezenas de ohms. Uma pequena impedância para o fio pode contribuir para um erro na medida de temperatura, como mostrado na Figura 4-2.





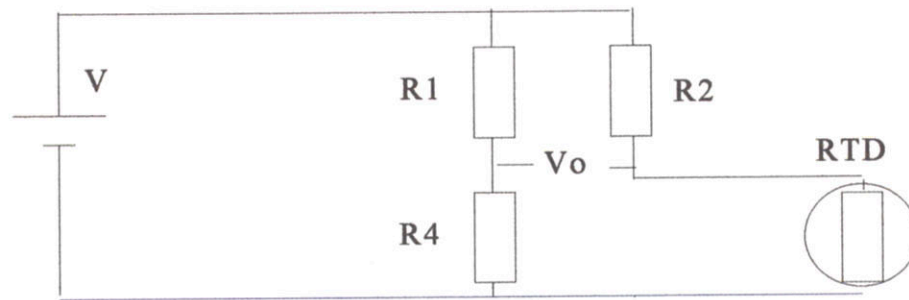
**Figura 4-2 - Efeito de Resistência de fio**

Uma dezena de ohm de impedância para o fio implica  $10 / 0,385 \cong 26^{\circ}\text{C}$  de erro nas medições. Mesmo o coeficiente de temperatura do fio pode contribuir com um erro de medida. O método clássico de evitar este problema é a utilização da ponte ( Figura 4-3).



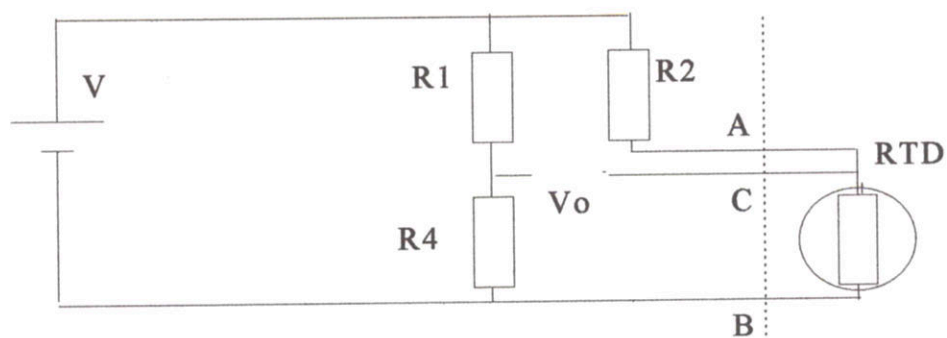
**Figura 4-3 - Ponte de Wheatstone**

A tensão de saída da ponte é uma indicação indireta da resistência de RTD. A ponte requer quatro fios de conexão, uma fonte externa e três resistores que tem um coeficiente de temperatura zero. Para evitar de sujeitar os três resistores da ponte para uma mesma temperatura como os RTD, o RTD é separado da ponte por meio de fios de extensão.



**Figura 4-4 - Ponte com prolongamento**

Essas extensões de fios recriam o problema inicial de impedância afetando as leituras da temperatura. Estes efeitos pode ser minimizados usando uma configuração de ponte a três fios (Figura 4-5)

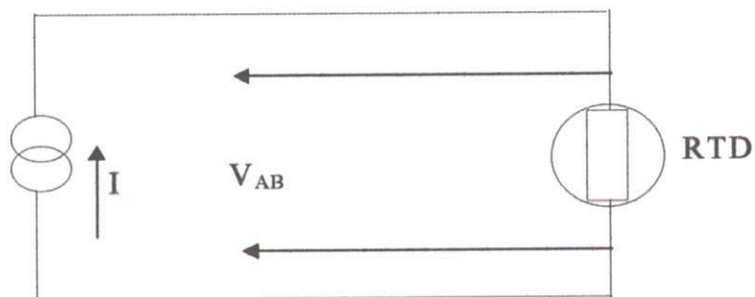


**Figura 4-5 - Medição a 3 fios**

Se os fios A e B tem exatamente o mesmo comprimento, seus efeitos de impedância se anularam, pois cada um está em braço oposto da ponte. O terceiro fio ( C ) não conduz corrente e, desta forma, não distorce o sinal de medição do transdutor.

A ponte de Wheatstone cria um relacionamento não-linear entre mudança da resistência e a mudança da tensão de saída da ponte. Isto compõe a já característica resistencia-temperatura não-linear do RTD requerendo uma equação adicional para converter a tensão de saída para a equivalente impedância do RTD.

A melhor forma evitar os problemas causados pela medição a três fios é realizar o circuito mostrado na Figura 4-6.



**Figura 4-6 - Medição a quatro fios**

Nesta configuração, uma corrente de excitação  $I$  passa através do RTD, gerando uma tensão proporcional ao valor de temperatura. Um voltímetro com resistência muito elevada medindo a tensão  $V_{AB}$ , não terá corrente por estes condutores e não haverá perda de tensão na linha.

A única desvantagem da medição a quatro fios está na necessidade de maior extensão de fios, acarretando preço final mais elevado.

### **4.3 - Montagem do circuito e equipamento**

#### **4.3.1 - Projetos dos circuitos de medição**

No desenvolvimento do circuito de instrumentação, três propostas básicas foram concebidas para implementação do circuito de medição de temperatura diferencial:

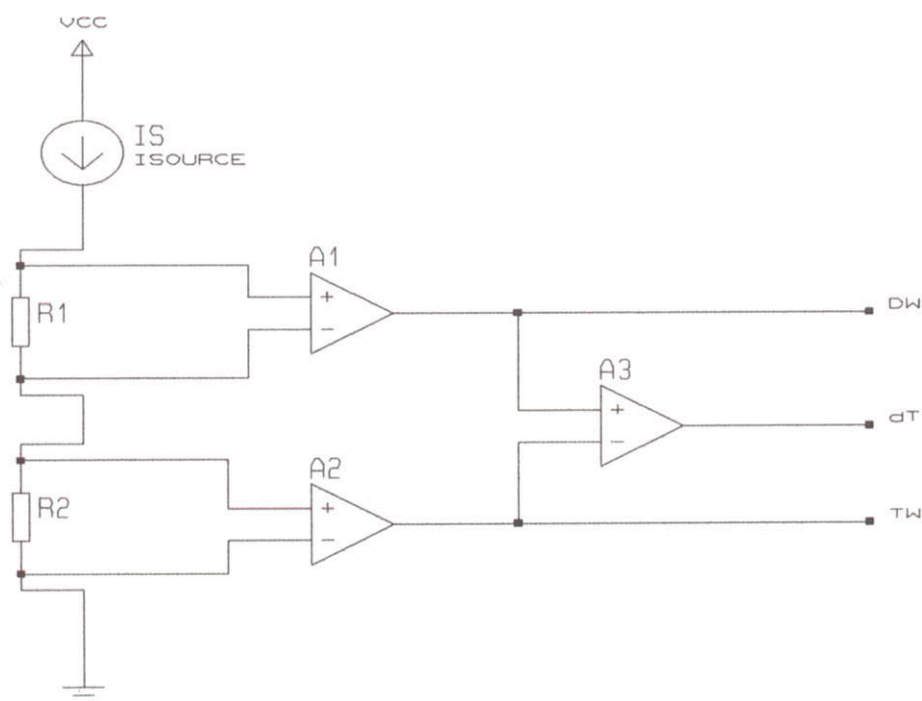
- Fonte de corrente para ambos sensores
- Fontes de corrente separada para cada sensor
- Ponte Amplificadora com dois sensores

A seguir serão expostas as análises de cada concepção utilizada.



### 4.3.1.1 Fonte de corrente para ambos sensores :

A idéia básica é mostrada abaixo:



**Figura 4-7 - Medição de temperatura com fonte de corrente**

Basicamente, uma corrente gerada pela fonte IS excita os dois PRTD, gerando uma tensão de saída. Um sistema de medição a quatro fios possibilita obter o valor de tensão sem perda através da linha. Os amplificadores de instrumentação A1 e A2 reforçam o sinal gerado, permitindo o sinal de medição de temperatura absoluta. O amplificador diferencial A3 é utilizado para obter o sinal de diferença de temperaturas.

Através de pesquisa em *databooks* e catálogos, obteve-se os componentes que possuíam as melhores características para esta aplicação. Os componentes foram selecionados pela seguinte razão:

**Termorresistor:** Havia a possibilidade de utilização de Pt100 ou Pt1000. A seleção recaiu sobre o segundo, devido a maior sensibilidade 10 vezes maior que o Pt100.

**Fonte de corrente:** Existia a possibilidade de construção de uma fonte de corrente ou utilização de fontes totalmente integradas. A segunda opção mostrou-se mais compacta e com boas características elétricas.

**Amplificadores de Instrumentação:** O principal problema para esta aplicação estava nas características de *offset* e *drift* do componente. Portanto, a procura resultou em um amplificador integrado *chopper stabilized* com características excelente em comparação com os demais. O único inconveniente estava na definição fixa de ganhos e no encapsulamento em montagem de superfície.

**Multiplexador e Conversor A/D:** Como o projeto visa realizar a menor quantidade de alterações possíveis, preferiu-se utilizar os componentes já pertencentes à placa analógica do equipamento padrão. Este componentes possuem características boas em comparação com os outros componentes do mercado. Outro fator que levou a esta escolha foi a necessidade de modificação da interface entre o cartão digital e o analógico e mudanças de software, o que elevaria em muito o tempo de desenvolvimento.

Após esta análise empírica, os componentes escolhidos foram:

**Platinum Resistance Temperature (PRT):**

Valor nominal a 0oC : 1000 Ohms  
 Fabricante: Heraeus  
 Classe: A  
 No. De fios: 4  
 Com cabeçote e tubo de proteção de alumínio.

**Fonte de Corrente: REF200**

Isolamento elétrico entre fontes  
 Precisão: 100uA  $\pm$  0.5%  
 - Incerteza de Corrente Typical:  $\pm$ 0.1 Máx:  $\pm$ 0.5  
 - Current Match : Typical:  $\pm$ 0.05 Máx:  $\pm$ 0.5  
 Ruído ( BW = 0.1 Hz to 10 Hz ) 1 nAp-p  
 ( f=10kHz ) 20 pA/ $\sqrt$ Hz  
 Coeficiente de Temperatura:  $\pm$  25ppm/oC  
 Tensão de Compliance: 2.5V to 40V

**Amplificador: LTC1100ACS**

Tensão de Offset	Típica: $\pm$ 1uV	Máx: $\pm$ 1uV Max
Tensão Offset Drift	Típica : 5nV/oC	Máx: 100 nV/oC
Corrente de Bias	Típica: 2.5 pA	Máx: 65 pA
Corrente de Offset	Típica: 10 pA	Máx: 65 pA
Ganho de não-linearidade	Típica: 3 ppm	Máx: 10 ppm
Erro de Ganho	Típica: 0.01 %	Máx: 0.06 %
CMRR	Típica: 110 db	Min: 85 db
0.1Hz-10Hz Ruído	2 $\mu$ Vp-p	

**Multiplexador: 74HC4351**

Faixa de tensão de entrada analógica:  $\pm$  5V  
 Resistência em ON: 60  $\Omega$  : Vcc - Vee=9V  
 Típica construção "break before make"

**Conversor Analógico Digital: ICL7135**

Garantia de precisão de  $\pm$ 1 incremento sobre  $\pm$ 20000 Incrementos ( 2.0000V Fim de escala )  
 Garantia de leitura nula para 0V  
 Verdadeira entrada diferencial  
 Polaridade verdadeira a valor Zero para um preciso Detector de Nulo  
 Requer tensão de referência simples  
 Sinais de Overrange e Underrange disponíveis com Capacidade de Auto-Range

Corrente de fuga	Tip: 1	Max 10 pA
Erro Radiométrico:	Min:-3	Tip:-1 Max: 0 Counts
Linearidade sobre ± Plena Escala ( Erro de leitura para melhor reta ):		Tip:0.5 Max: 1 LSB
Erro de Rollover ( Diferença na leitura de tensões iguais positivas e negativas próxima do fundo de escala)		Tip: 0.5 Max: 1 LSB
Ruído (Valor P-P não excede a 95% do tempo) eN 15uV		Tip: 0.5 Max: 2 uV/oC
Drift de Zero de leitura		Tip: 0.5 Max: 2 uV/oC
Coefficiente de temperatura do fator de escala. TC	Tip:2	Max: 5 ppm/oC

Através da utilização da lei de Ohm e não considerando perdas por impedâncias internas, pode-se obter as seguintes equações de transferência do sistema:

$$DW = G_1 \cdot I \cdot R_1 \text{ ( V )} \quad (4-5)$$

onde: DW - Tensão de saída representativa da temperatura no sensor no ponto 2 ( V )

$G_1$  - Ganho do amplificador A1

I - Corrente de excitação ( A )

$R_1$  - Resistência representativa da temperatura do sensor no ponto 2 (  $\Omega$  )

$$TW = G_2 \cdot I \cdot R_2 \text{ ( V )} \quad (4-6)$$

onde: TW - Tensão de saída representativa da temperatura no sensor no ponto 1 ( V )

$G_2$  - Ganho do amplificador A2

I - Corrente de excitação ( A )

$R_2$  - Resistência representativa da temperatura do sensor no ponto 1 (  $\Omega$  )

$$dT = G_A \cdot G_3 \cdot I \cdot (G_1 \cdot R_1 - G_2 \cdot R_2) \text{ ( V )} \quad (4-7)$$

onde: dT - Tensão de saída representativa da diferença da temperatura entre sensores (V)

$G_3$  - Ganho do amplificador A3

$G_A$  - Ganho referente a conversão do sinal de analógico para digital

Das características dos componentes anteriores, determina-se que:

$$G_1 = 10$$

$$G_A = 10000$$

$$I = 100\mu\text{A}$$

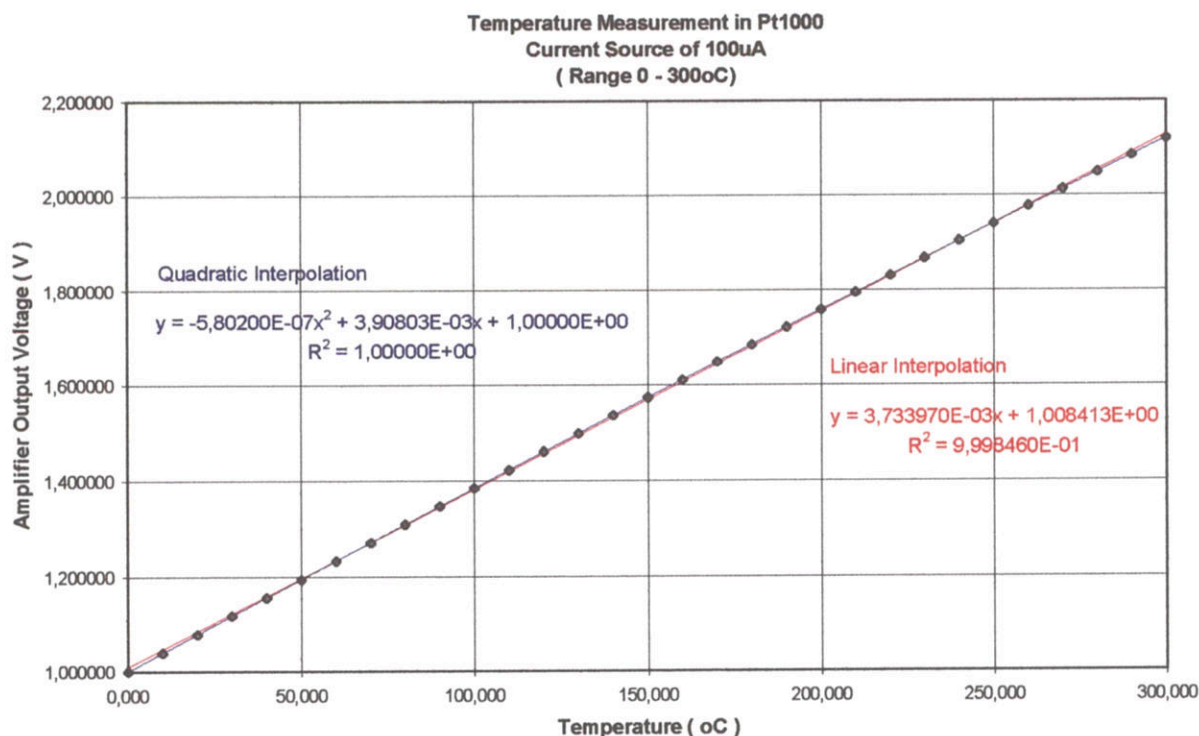
$$G_2 = 10$$

$$G_3 = 100$$

$$R_1 = R_2 = 1000 \Omega \text{ at } 0^\circ\text{C}$$



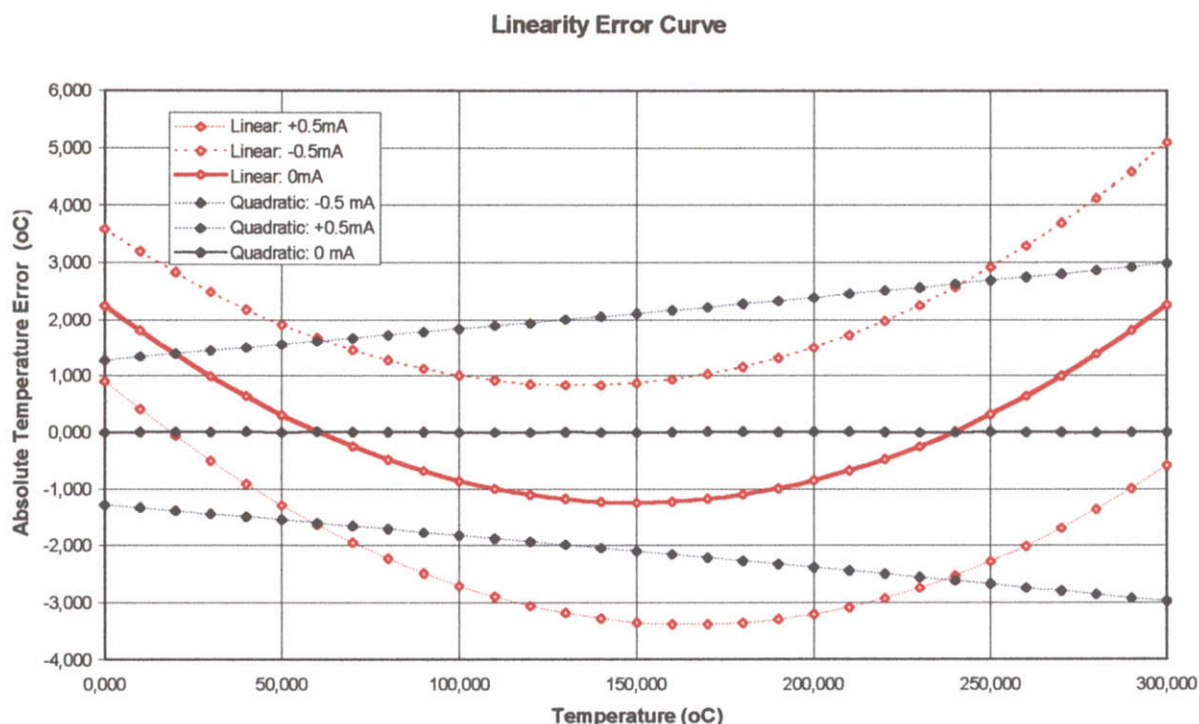
Utilizando estes valores, e utilizando a equação de PRTD em função da temperatura, em conjunto com a equação acima, pode-se determinar a função estática mostrada na Figura 4-8.



**Figura 4-8**

As equações apresentadas são interpolações frente aos valores teóricos da equação acima. Através destas torna-se possível observar que a resposta polinomial de segunda ordem do sistema. Também pode-se verificar que para esta configuração, por limite máximo de 2.0000 V no Conversor AD, a faixa de operação desta fica restrita entre 0 e 266°C.

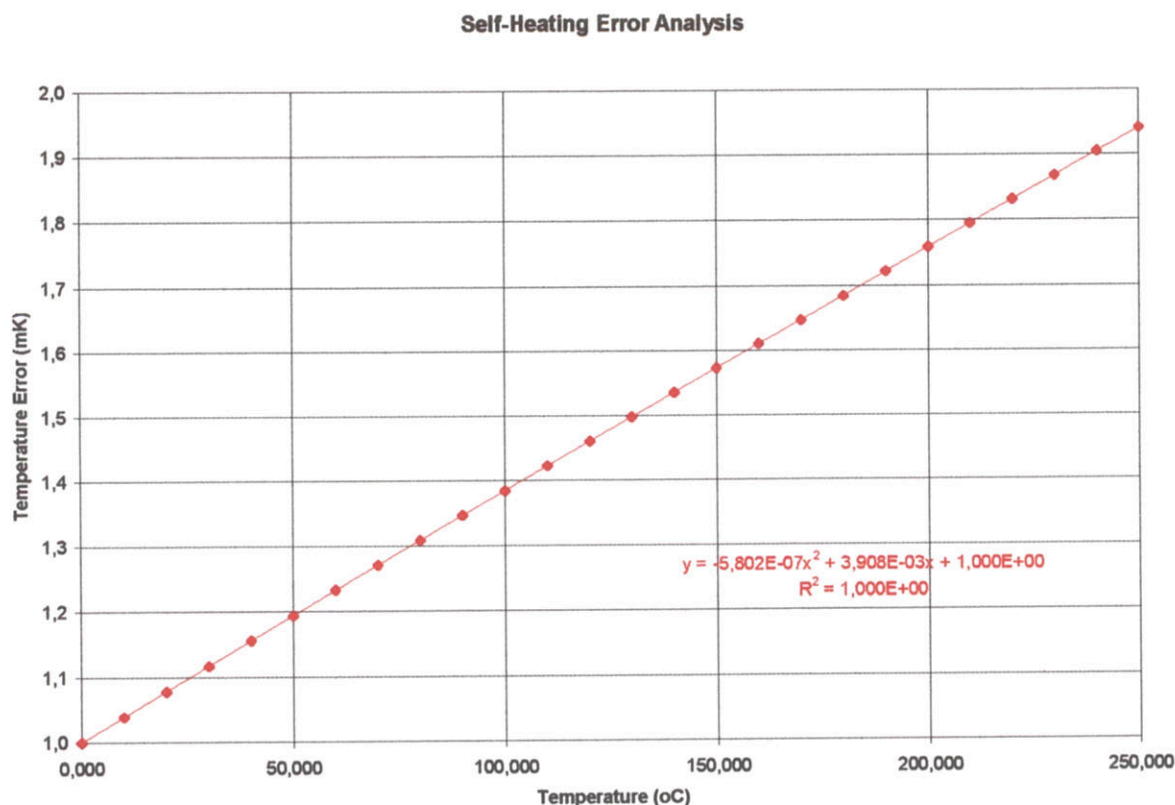
Se for analisada a variação da fonte de corrente, segundo especificações de  $\pm 0.5\%$  sobre o valor de saída, pode-se obter na Figura 4-9 referente ao erro de linearidade em função da variação da temperatura e corrente.



**Figura 4-9**

Deste resultado verifica-se que, para esta faixa de operação, os erros introduzidos pela interpolação linear podem chegar a 2.263 °C, enquanto a interpolação quadrática atinge valores 0.013 °C. Entretanto, se a corrente de alimentação tiver seu valores diferentes entre os limites  $\pm 0.5$  mA, os erros podem ser elevados a  $\pm 3$  °C para interpolação quadrática. Por outro lado, analisando a folha de dados do componente, verifica-se que este parâmetro é relativo à do componente, mas que uma vez instalado possui um funcionamento estável durante o tempo. Este fato mostra que quando for necessário substituição da fonte de corrente do circuito, uma compensação deve ser realizada.

Com relação ao erro decorrente do auto-aquecimento, realizou-se a seguinte análise: O valor de auto-aquecimento é proveniente da folha de dados do fabricante de sensores Heraeus . Neste constava somente o valor do coeficiente de auto-aquecimento para ar em movimento. Entretanto, a folha de dados mostra também a diferença entre a constante de tempo do sensor em água e em ar, sendo a constante de ar 20 vezes maior que água. A folha de dados também sugere que o erro de auto-aquecimento chega a 20 vezes maior no ar que na água. Usando o valor de 20 vezes reduzido, obtém-se o valor de aproximadamente 0.1 K/mW para o coeficiente de auto-aquecimento ( E ). Utilizando então as equações (3.4) do PRTD e (4.4) do erro de medição, analisou-se os erros e o resultado final é resumido na Figura 4-10.



**Figura 4-10**

A Figura 4-10 ilustra que o máximo erro causado por auto-aquecimento é inferior a 2 mK na faixa entre 0 e 250 °C. Também se verifica o valor auto-aquecimento segue a função quadrática, característica do PRTD.

A sensibilidade do sistema para temperatura diferencial é ( $R_1$  a 0°C and  $R_2$  a 1°C):

$$V_{S_D} = Tw(1^\circ C) - Dw(0^\circ) = 0.39(V/^\circ C) \Rightarrow S = 2.5641(^\circ C / V)$$

ou em valores de Incremento digital (DI):

$$V_{S_D} = 3900(DI/^\circ C^{-1}) \Rightarrow S = 0.25641(mK / DI)$$

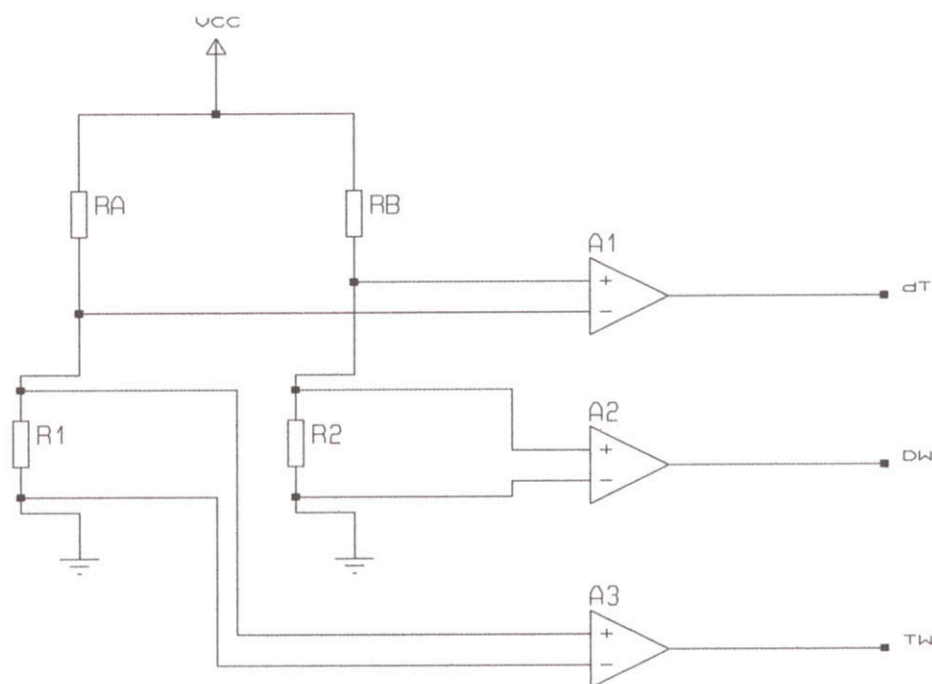
Este valor torna-se importante, pois determina o valor teórico para transformar o sinal de saída em temperatura. Também conclui-se deste resultado, a resolução do sistema de medição, equivalente a 0.256 mK.

O projeto final da fonte de corrente está exposto no anexo I.



### b) Ponte Amplificadora:

A idéia principal de uso da ponte amplificadora ( Ponte de Wheatstone ) está mostrada na Figura 4-11.

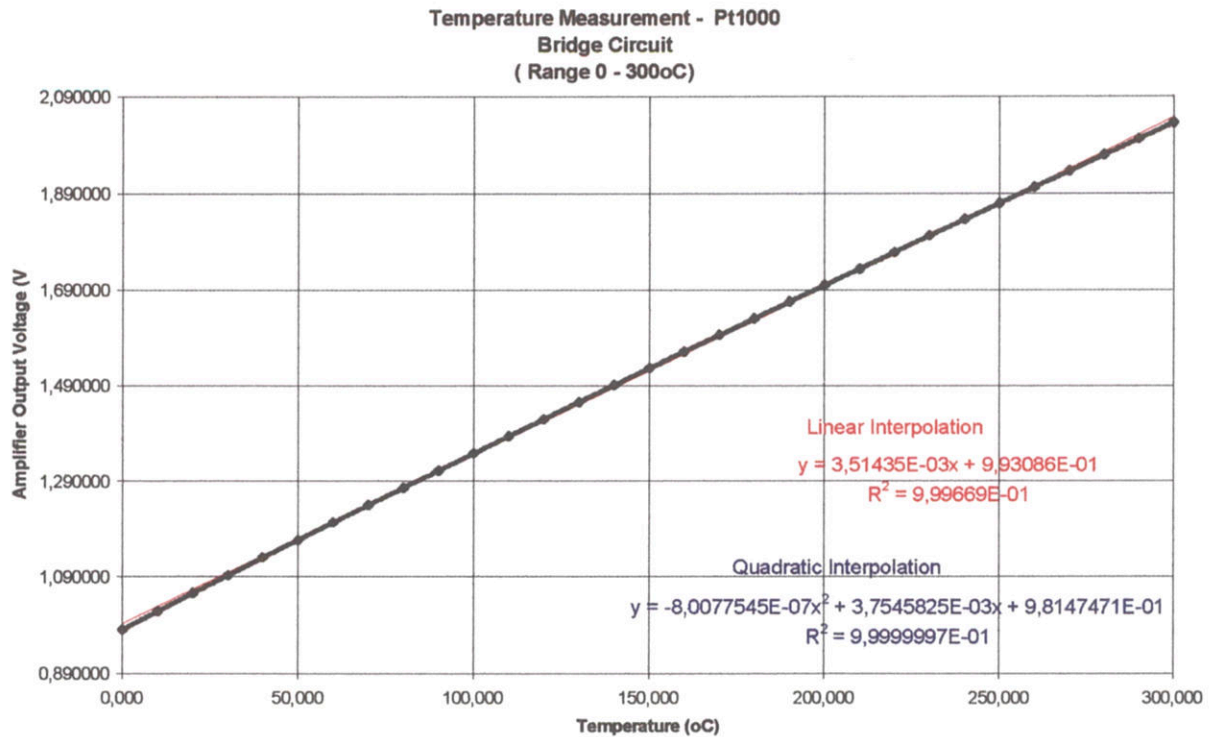


**Figura 4-11 - Ponte de wheatstone**

Neste princípio, os dois sensores são colocados em braços diferentes da ponte. O valor de temperatura diferencial é obtido medindo-se a diferença entre os dois braços da ponte. O valor de temperatura absoluta é obtida medindo-se a tensão sobre os sensores.

Analisando a implementação desta idéia, verifica-se que para obter uma boa implementação, tentando-se evitar os erros provenientes da não-linearidade da ponte, a razão entre  $R_A$  e  $R_1$  deveria ser maior que 100 vezes o valor de  $R_1$ . Entretanto, isto comprometeria a sensibilidade da medição de temperatura. Um valor arbitrado, que permite bons valores, é 50 vezes. Assim, os novos valores de  $R_A$  e  $R_B$  é 49950 Ohms , sendo 49900 Ohms fixos e 50 Ohms com trimpot para ajuste de zero.

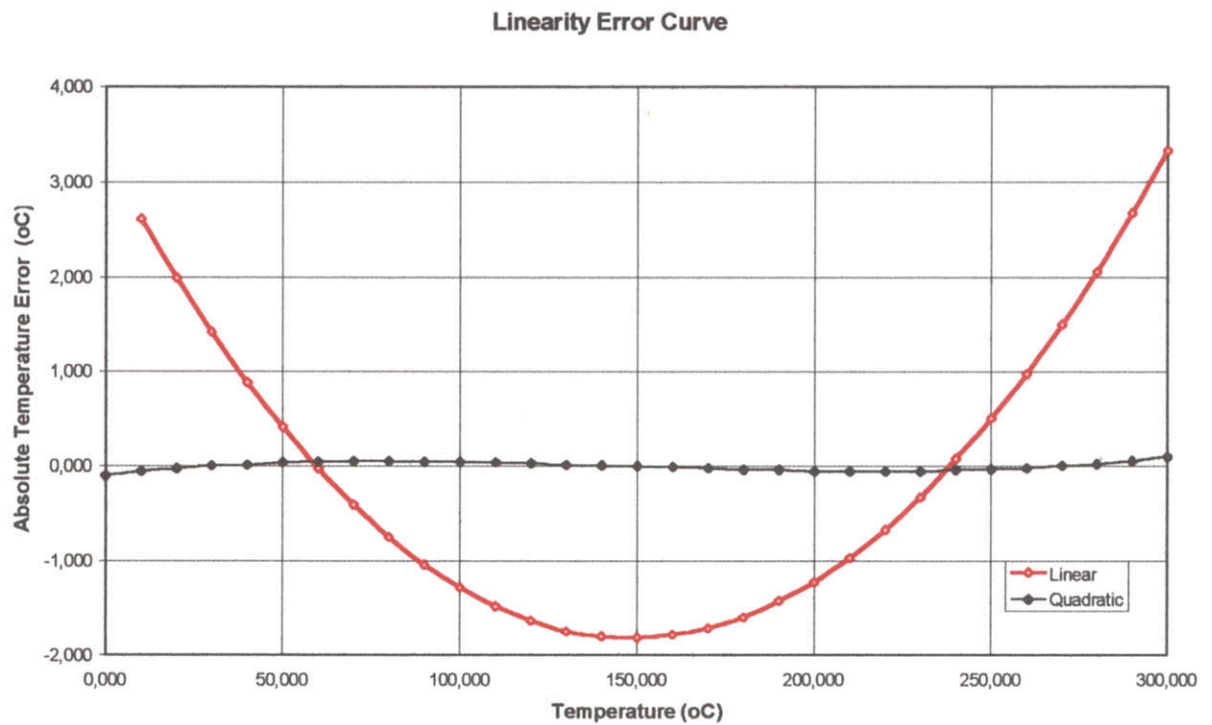
O gráfico de característica de resposta para esta configuração pode ser verificado na Figura 4-12.



**Figura 4-12**

Pode-se notar que a faixa de indicação para este projeto atinge o máximo de 289°C.

Ao se avaliar os erros de linearidade da ponte, obtém-se:



**Figura 4-13**

Da mesma forma que o projeto anterior, a interpolação quadrática, com erro máximo de 0.059°C, atinge erros menores que os valores obtidos com interpolação linear, com 3.329°C.

Um problema gerado por esta configuração está na sensibilidade da medição de temperatura diferencial. Através da equação 4.8 :

$$dT = \left( \frac{R_1}{R_1 + R_A} - \frac{R_2}{R_2 + R_B} \right) \cdot G_1 \cdot V_{cc} \text{ (V)} \quad (4-8)$$

onde: dT - Tensão de saída representativa da diferença da temperatura entre sensores (V)

G<sub>1</sub> - Ganho do amplificador A1

R<sub>1</sub> - Resistência representativa da temperatura do sensor no ponto 2 (Ω)

R<sub>2</sub> - Resistência representativa da temperatura do sensor no ponto 1 (Ω)

R<sub>A</sub> e R<sub>B</sub> - Resistência complementares para formação da ponte (Ω)

E utilizando os seguintes valores de projeto:

$$V_{cc} = 5 \text{ V}$$

$$G_1 = 100$$

$$R_A = R_B = 49950 \text{ Ohm}$$

$$T(R_1) - T(R_2) = 1 \text{ mK}$$

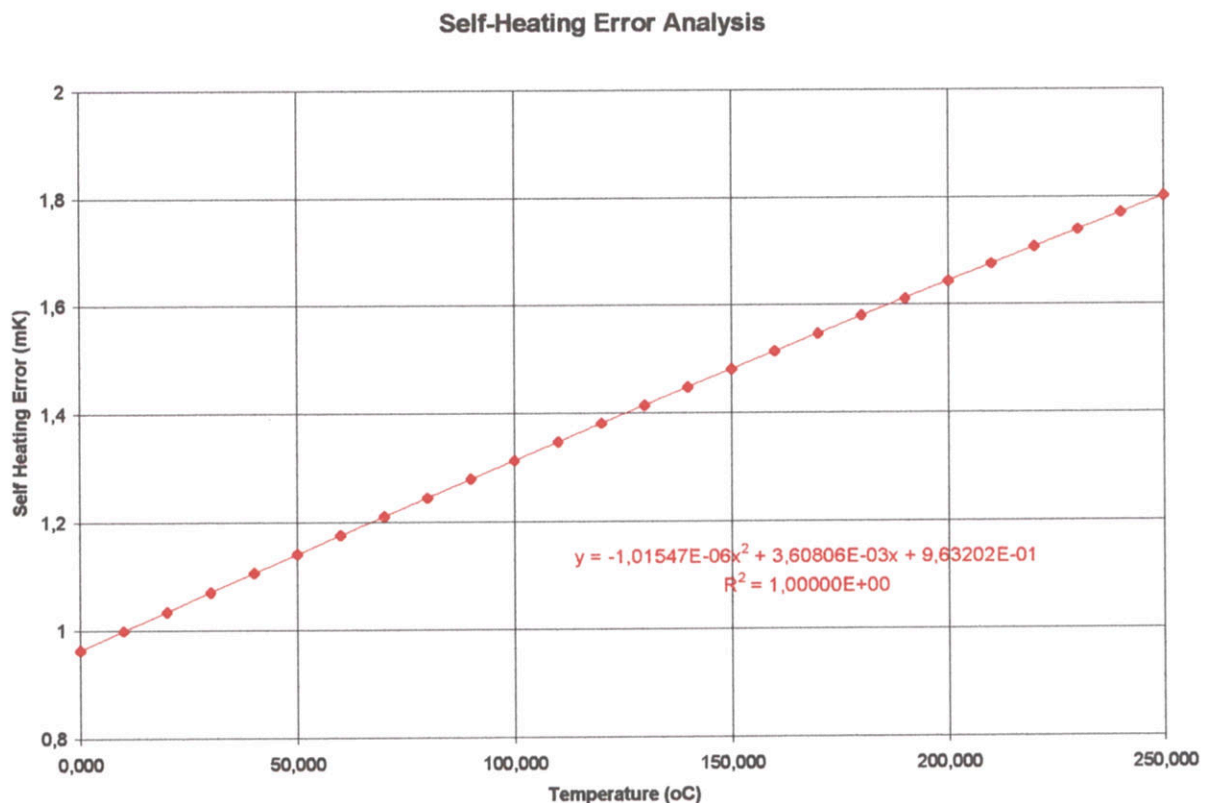
Verifica-se que o valor de dT será de 3,7598.10<sup>-5</sup> V, e não poderá ser medido pelo Conversor A/D de resolução de 0,0001 V. Assim, valores inferiores a aproximadamente 3mK não são possíveis de medir. Para contornar este problema, utiliza-se um estágio secundário de amplificação. A equação acima fica multiplicada pelo ganho do amplificador (10) e a resolução se torna igual a 0,28 mK, equiparando-se ao projeto do circuito anterior.

Com relação ao erro de auto-aquecimento, utilizando a mesma restrição exposta anteriormente, com base na folha de dados arbitra-se o valor de 0,1 K/mW para o coeficiente de auto-aquecimento (E) e utilizando a equação:



$$\Delta T = \left( \frac{V_{cc}}{R_1 + R_A} \right)^2 \cdot R_1 \cdot 1000 \cdot E \text{ (mK)} \quad (4-9)$$

Obtém-se o gráfico da Figura 4-14, na qual pode-se notar que o erro por auto-aquecimento é inferior a 1.8 mK e possui características quadráticas, esperadas em virtude das características do termorresistor de platina.



**Figura 4-14**

### 4.3.2 - Implementação e testes da placa de circuito impresso

O desenvolvimento dos circuitos eletrônicos basearam-se no processo denominado de prototipação, devido a grande dificuldade de obtenção dos ruídos nos resultados antecipadamente.

O desenvolvimento do projeto completou-se com a realização de 3 protótipos: a primeira foi realizada para testes e reconhecimento do circuito de fonte de corrente, a segunda foi uma melhoria realizada na implementação final no medidor e a terceira, uma implementação do circuito de ponte de Wheatstone. Todos os protótipos seguiram os

procedimentos descritos no Anexo V - Projeto e Implementação de Placas de Circuito Impresso. O resultados destes trabalhos são mostrados nos anexos I e II.

Especificando o procedimento realizado para desenvolvimento destes, pode-se relatar o seguinte:

1) **Construção e testes do primeiro protótipo:** A primeira versão baseou-se no circuito de fonte de corrente sem filtros passivos na saída. Durante a realização dos testes verificou-se grande quantidade de ruídos, próximo da faixa de 2kHz. Uma análise nas folhas de dados ilustraram que a fonte de ruído provinham dos próprios amplificadores. Um filtro passivo de primeira ordem, com frequência de corte de 10 rad/s foi implementado, reduzindo substancialmente o problema.

Um segundo tipo de ruído foi identificado no sistema. De frequência igual a rede elétrica (50Hz em UK) apresentava-se somente na saída de temperatura diferencial e que não eram gerados pelas conexões de sinais e blindagem no interior da caixa. O problema era causado por ruídos existentes no cabeçote dos sensores, que uma vez ligados à malha de terra do equipamento, resolveu o problema.

Durante esta etapa planejou-se a forma de conexão com a placa analógica. No projeto da placa analógica haviam bornes que permitiam conexão ao sistema. Entretanto, necessitou-se retirar todos os componentes relacionados com a medição de temperatura do *Yatesmeter*. Para se tornar um projeto mais profissional, esta foi fixada sobre a placa analógica através de extensores e a ligação elétrica foi realizada por fios flexíveis soldados.

2) **Construção e teste do segundo protótipo:** Com as modificações implementadas, reprojeteu-se a placa prevendo a implementação dos filtros analógicos.

A construção foi realizada com novos componentes. Testes posteriores demonstraram problemas na primeira versão decorrentes do super aquecimento na colocação dos componentes por montagem de superfície. Entretanto, um ruído entre a entrada do multiplexador e a saída do amplificador de temperatura diferencial, existente somente quando conectados, denegria os resultados.

Através da análise do circuito, detectou-se que o problema era causado por um filtro existente entre o multiplexador e o conversor analógico/digital. A resolução deste último problema fez o circuito apresentar ruídos inferiores a 2mK.

3) **Construção do terceiro protótipo:** O terceiro sistema construído foi o projeto da ponte de Wheatstone, construída com o objetivo de verificar a resposta frente ao circuito de fonte de corrente. Como foi construída posteriormente, poucos testes foram possíveis

realizar, mas demonstraram um funcionamento adequado e que poderia também ser utilizado para medição, executando algumas medidas para reduzir o erro sistemático.

### 4.3.3 - Alterações no software para os sensores RTD

Como definido em projeto, a utilização de interpolação quadrática para grande faixa de medição levaria a erros de linearidade maiores do que esperado por norma. A necessidade de calibração diferenciada entre circuito e transdutor também exigiu modificações no programa.

O sistema *Yatesmeter* possui dois programas para obter as informações do processo. Um destes é armazenado em EPROM e controla o funcionamento do *Yatesmeter*, obtendo em tempo real a eficiência do sistema. O outro é um programa de interface com o usuário e responde por armazenamento, impressão e visualização dos dados. Este roda no computador portátil e atualmente trabalha em ambiente DOS, entretanto nova versão para Window está sendo finalizada.

Focando no programa monitor que trabalha junto ao *Yatesmeter*, a Figura 4-15 mostra o fluxograma de trabalho.

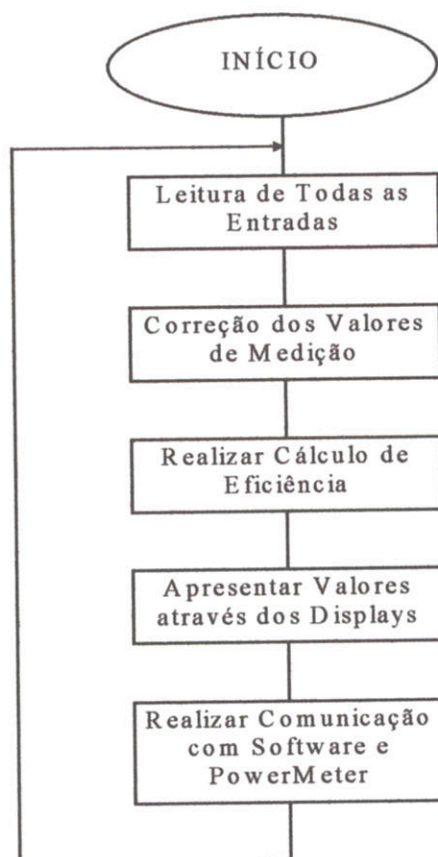


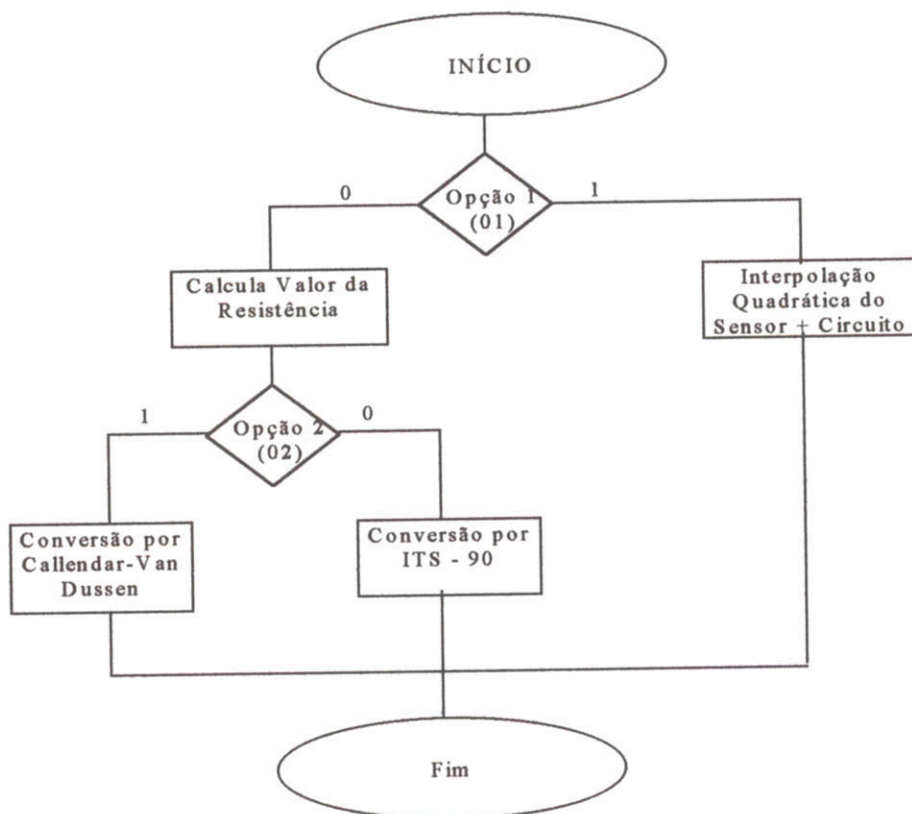
Figura 4-15 - Fluxograma geral



A modificação foi realizada junto ao bloco *Correção de Valores de Medição*. O programa *Yatesmeter* padrão possui nesta região as equações de linearização. Os coeficientes de correção, segundo a equação  $V_1 = G \cdot V_0 + Z$ , são armazenados em duas tabelas CAL e CIRCUIT. As tabelas possuem o seguinte mapeamento:

<b>Índice da Tabela</b>	<b>Função em CAL</b>	<b>Função em CIRCUIT</b>
0	Temperatura diferencial ( dT )	Temperatura diferencial ( dT )
1	Temperatura da Água ( TW )	Temperatura da Água ( TW )
2	Pressão de sucção ( PS )	Pressão de sucção ( PS )
3	Pressão de descarga ( PD )	Pressão de descarga ( PD )
4	Temperatura de Descarga ( DW )	Temperatura de Descarga ( DW )
5	Disponível ( P5 )	Disponível ( P5 )
6	Disponível ( P6 )	Disponível ( P6 )
7	Disponível ( P7 )	Disponível ( P7 )
8	Correção de linearidade de temperatura diferencial ( dT )	-

Consistiu em substituir a rotina existente, que utilizava interpolação linear, pela rotina de interpolação quadrática. O fluxograma esquemático pode ser verificado na Figura 4-16.



**Figura 4-16 - Fluxograma da rotina**

#### 4.3.4 - Montagem do equipamento final

Com a placa analógica funcionando adequadamente, necessitava-se da construção do gabinete final. Basicamente, a construção do novo gabinete seguiu os padrões de um equipamento normal, somente modificando as seguintes partes:

1. **Troca do painel frontal:** Para diferenciar visualmente os dois equipamentos, o painel frontal possui inscrições vermelhas. Os displays também tiveram suas cores modificadas para vermelho, acompanhando a tendência.
2. **Modificação da placa analógica e conexões:** A placa analógica alterada foi colocada na posição da placa padrão. Os conectores para medição de temperatura foram também alterados de 3 vias para 6 vias, possibilitando a medição por 4 fios com a malha de blindagem.
3. **Utilização do software para PRT:** Por necessitar de correção para alta temperatura, o sistema utiliza em EPROM uma versão diferenciada que permite interpolação quadrática.

A principal vantagem deste sistema está na facilidade de posterior construção, pois utiliza praticamente a mesma configuração do equipamento de linha e não necessita grande quantidade de adaptações.

Uma foto do kit completo pode ser visualizada na Figura 4-17. Fazem parte deste o medidor de eficiência HT Yatesmeter (ao centro), um medidor de potência *PowerMeter* (à direita) e um computador portátil (a esquerda).

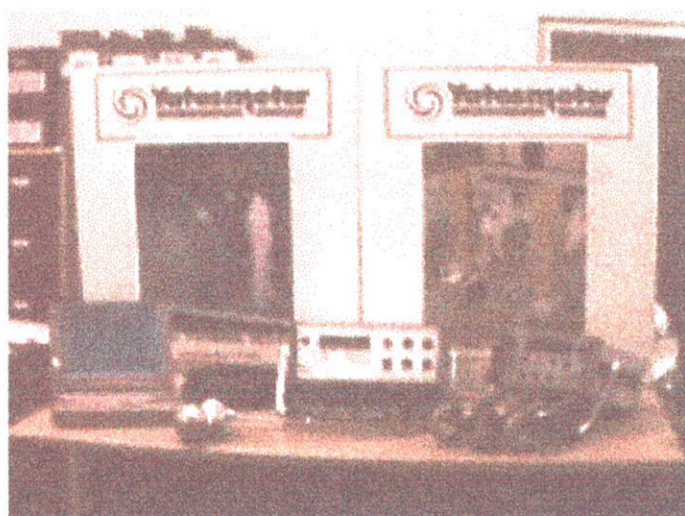


Figura 4-17 - Conjunto HT Yatesmeter

#### **4.4 - Conclusão**

Descreveu-se neste capítulo todo o processo de projeto e desenvolvimento para fabricação da unidade HT Yatesmeter. A forma final apresentou um grande facilidade de adaptação ao equipamento padrão, não sendo necessário um grande retreinamento de mão de obra.

O projeto realizado demonstrou a dificuldade de implementação de instrumentos de precisão, uma vez que ruídos, normalmente pequenos, tornam-se relevantes. Neste caso, a solução se torna uma construção peculiar, onde a resolução por prototipação fornece uma resposta de que tipo de problemas são importantes.

A disponibilidade de diversos tipos de calibração permite uma melhor flexibilidade na troca de sensores.



## 5. Resultados de experimentação:

### 5.1 - Introdução

Uma das principais partes deste trabalho está na realização de experimentação para determinação e comprovação das características de funcionamento do sistema. Devido a grande quantidade de experimentos realizados, somente os principais resultados serão expostos neste documento.

A aquisição de sinais foi realizada através da conexão serial entre o computador e a Unidade HT. Utilizou-se o programa, denominado *LOG PRT* para a observação e arquivamento dos sinais. Este programa foi desenvolvido na própria empresa.

No casos de ensaios de campo, utilizou-se o programa *YM3b7* para a observação de todas as variáveis necessárias para o cálculo de eficiência da bomba.

### 5.2 - Ensaio de Calibração do Equipamento

Este tipo de ensaio consistia em utilizar algum equipamento para geração de uma temperatura conhecida. A comparação posterior entre valores de resposta e padrões geravam os coeficientes das equações de interpolação para o sistema.

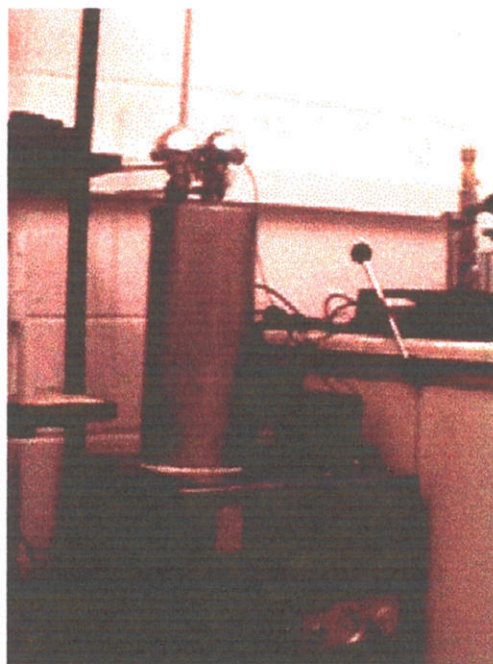
Este tipo de ensaio foi classificado em dois conjuntos:

- Calibração para medição em baixa temperatura
- Calibração para medição em alta temperatura

#### 5.2.1 - Calibração em baixa temperatura

O experimento consistiu em colocar os PRTs em um fluxo constante de água com temperatura controlada, através do equipamento DBT Thermostats da HETO - Lab Equipment (Figura 5-1), que possui as seguintes características ( citadas somente as mais importantes):

Resolução :	$\pm 0.1$ °C ( para medição no equipamento)
Estabilidade da temperatura:	$\pm 0.001$ °C
Sensor de Controle :	PRT
Controle de Temperatura :	PID
Consumo de energia do aquecedor:	2000W
Pressão da Bomba (Max):	325 mbar em 0 l/min
Vazão da bomba:	7 l/min



**Figura 5-1 - Banho de calibração**

A temperatura real foi medida através de um Termômetro de Quartzo Heraeus, colocado junto aos sensores. Este sensor possui as seguintes características:

Marca:	QuaD100
Precisão:	$\pm 0.1$ °C na faixa -20 a 130 °C
Resolução:	0.01 °C entre -50 a 199.99 °C 0.1 °C entre 200 a 350 °C

Sabe-se que o padrão utilizado não tem a exatidão necessária para atingir o valor de 0.1°C. Entretanto, por falta de instrumento de melhor incerteza da própria companhia, este foi utilizado.

Utilizando estes equipamentos, realizou-se um total de 6 experimentos. Os primeiros 4 averiguaram o funcionamento, sendo utilizado para correções no sistema. Somente a partir do 4º. experimento, começou-se a utilizar aquisição automática de dados, através de adaptação de um software da empresa.

#### *5.2.1.1 Fonte de corrente sem filtragem*

Testou--se a primeira versão do circuito fonte de corrente ( sem a implementação do filtro ) na 5ª calibração.

A resposta dos sensores são registradas nas Figura 5-2 e Figura 5-3.

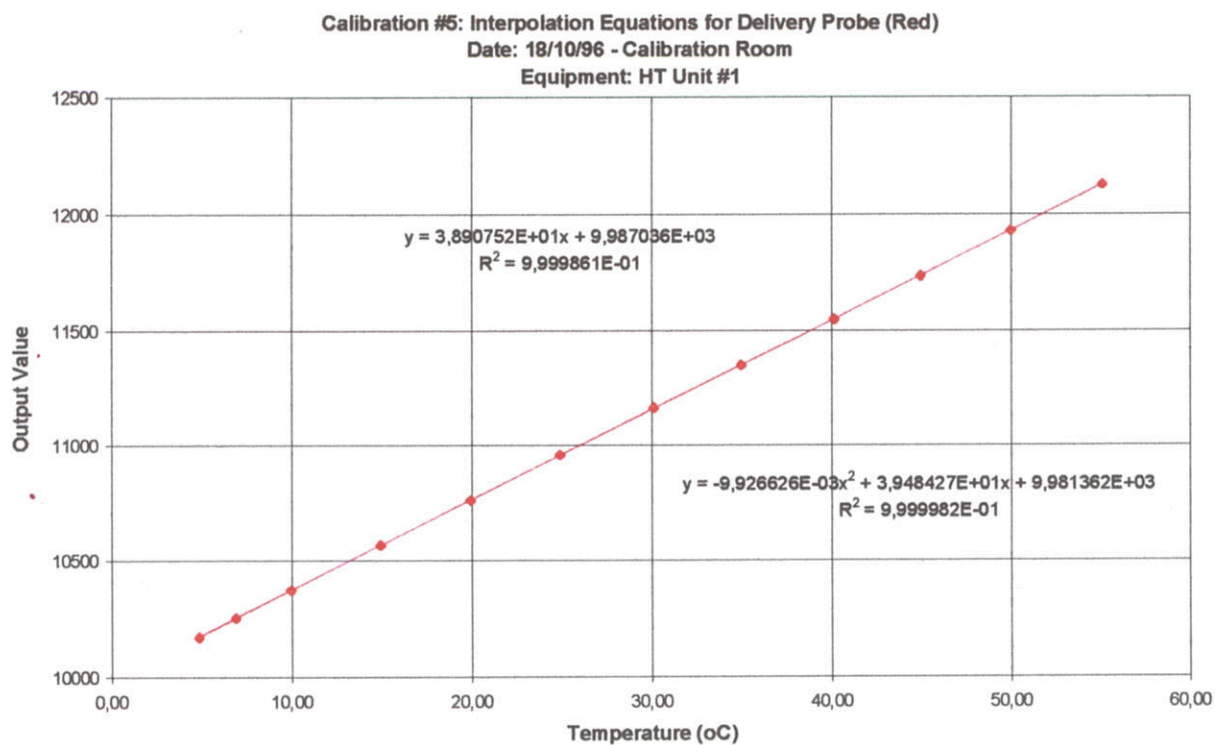


Figura 5-2

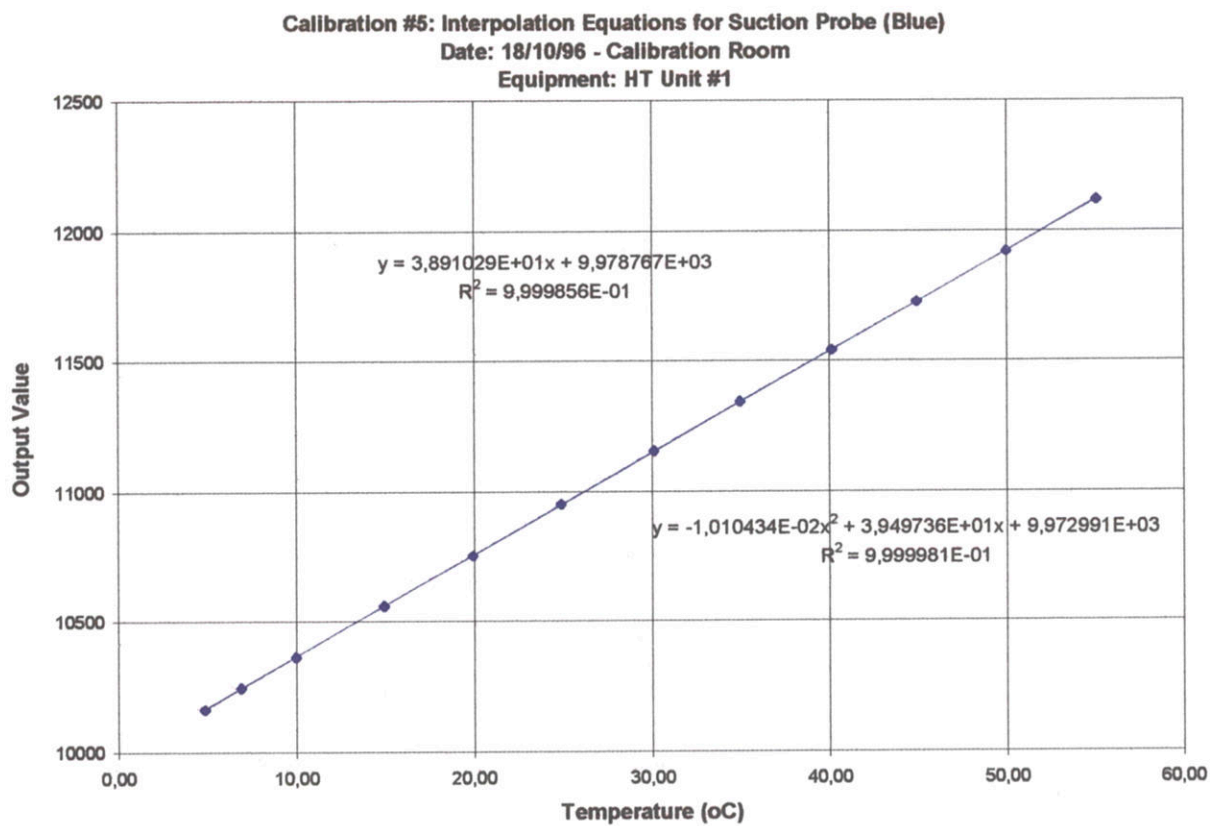
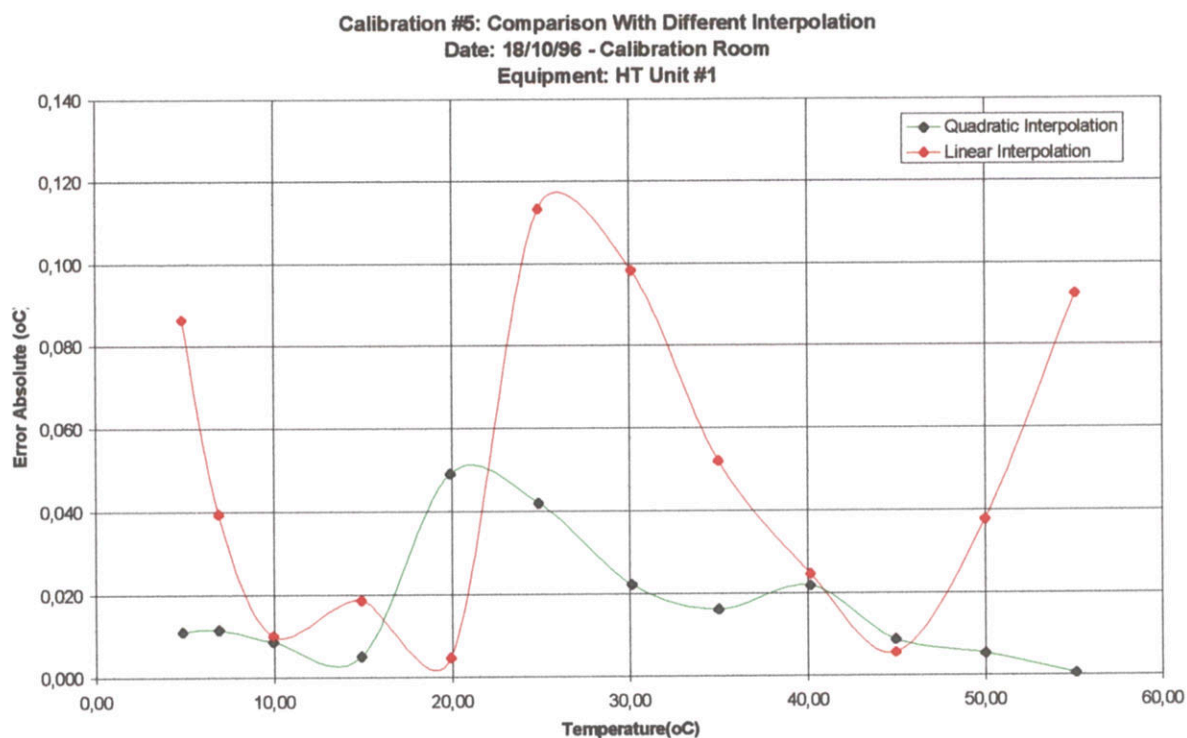


Figura 5-3



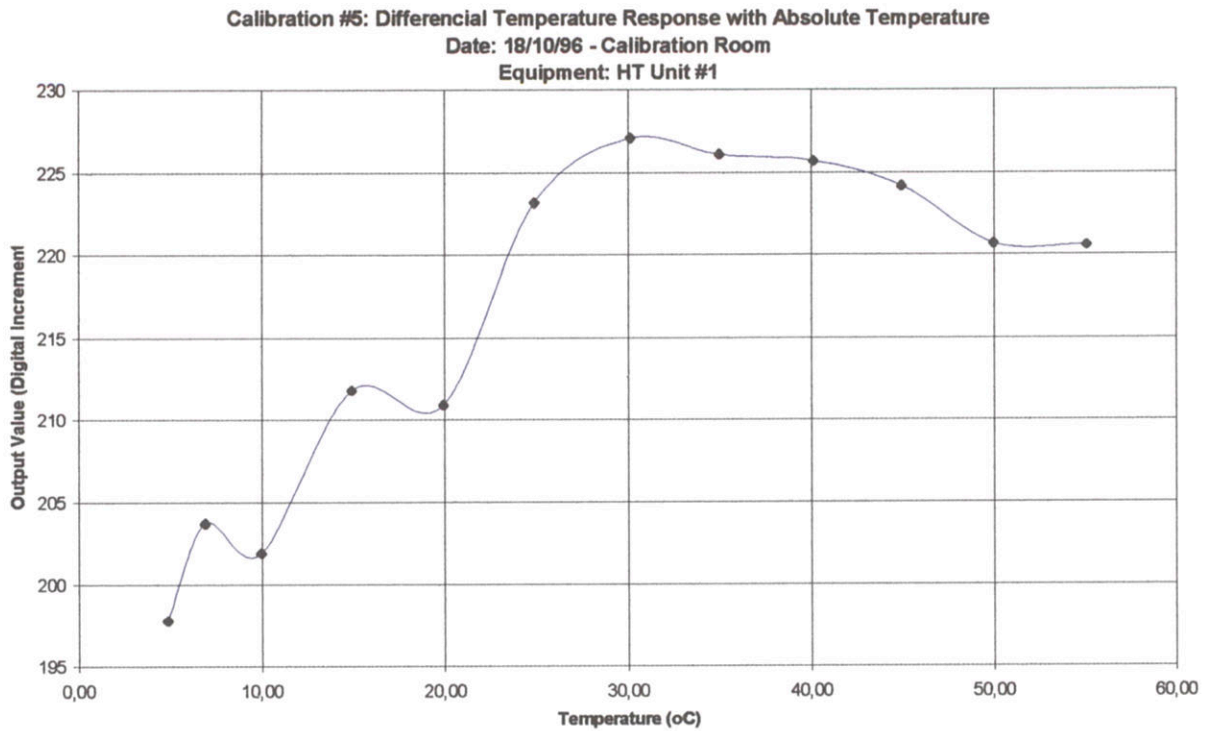
Nestas figura pode-se verificar que a interpolação quadrática tem um ajuste melhor que a linear. Entretanto, a interpolação linear possui resultados também bastante próximos dos valores medidos. A Figura 5-4 expõem o erro de linearidade para o sensor e a Figura 5-5, a resposta à temperatura diferencial.



**Figura 5-4**

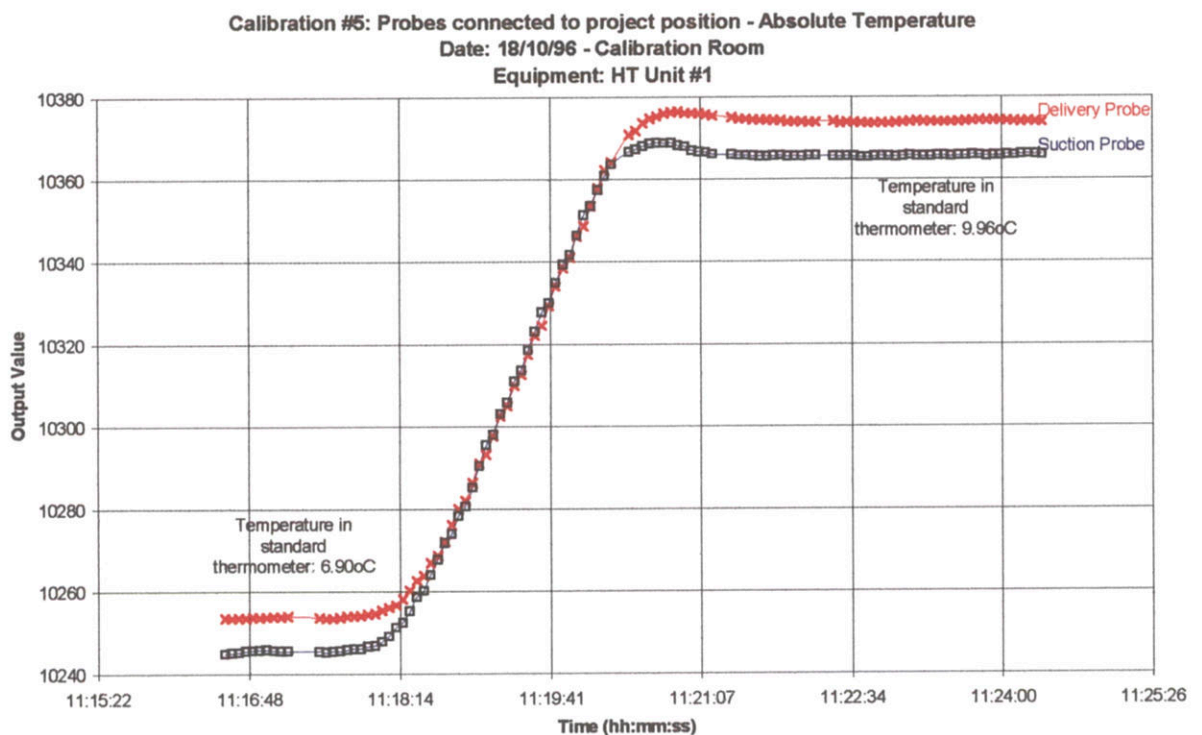
Na Figura 5-4, a interpolação linear possui somente um ponto externo à faixa de  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ .

Na Figura 5-5 mostrou estes resultados devido a ruídos decorrentes dos amplificadores, que causavam grande variação no sinal. Posteriormente, a implementação de filtros e correção da placa analógica solucionaram o problema.

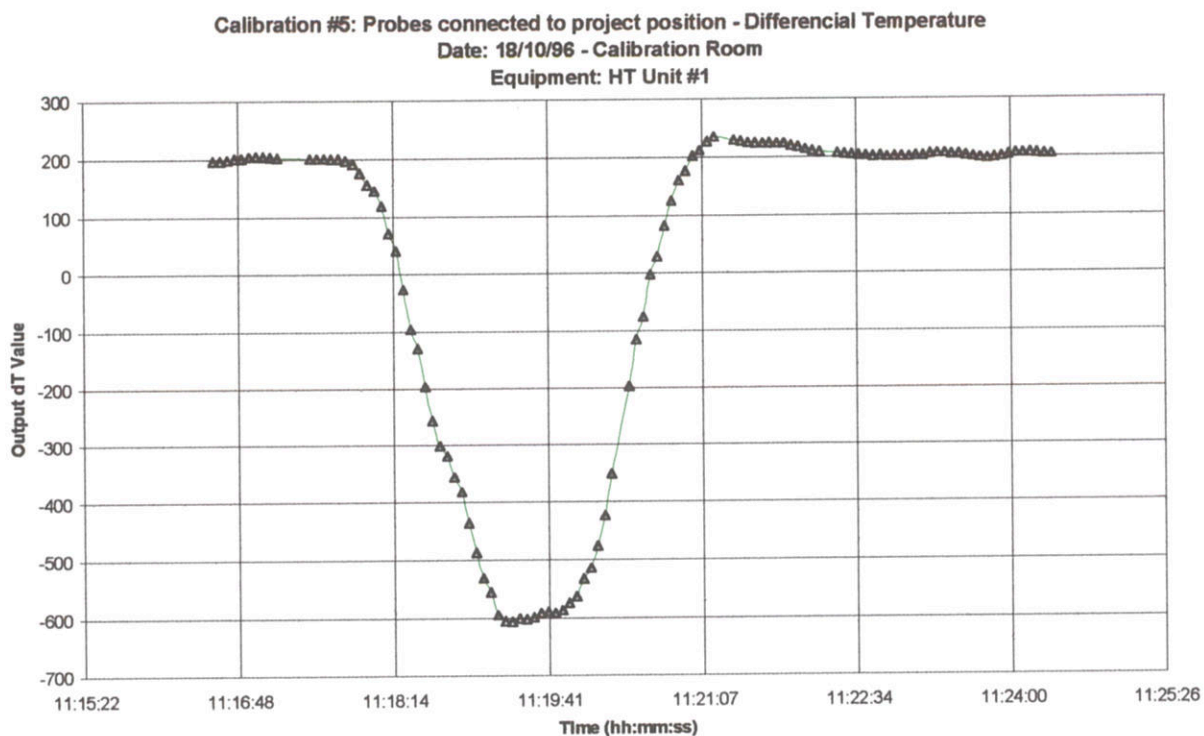


**Figura 5-5**

Analisando-se uma resposta do sensor e banho obteve-se a resposta para a mudança de 10 para 15 °C , ilustrada na Figura 5-6 - Temp. Absoluta e Figura 5-7 - Temp. Diferencial.



**Figura 5-6**



**Figura 5-7**

Analisando a resposta no tempo para esta mudança, pode-se verificar uma diferença entre os sinais de temperatura absoluta, uma vez que ambos estão na mesma temperatura. Este fato vem, talvez, da diferenças entre ganhos dos amplificadores. Esta variação, pode ser decorrente da forma da colocação do componentes de montagem de superfície, utilizando a pistola de aquecimento, com a conseqüente danificação do componente.

O valor de resposta para temperatura diferencial ilustra sua variação quando a diferença de temperatura entre sensores também não é estável.

#### 5.2.1.2 Fonte de corrente com filtragem

A 7ª calibração foi realizada sobre a última versão do circuito. A resposta com relação à temperatura absoluta é mostrada no gráfico abaixo.



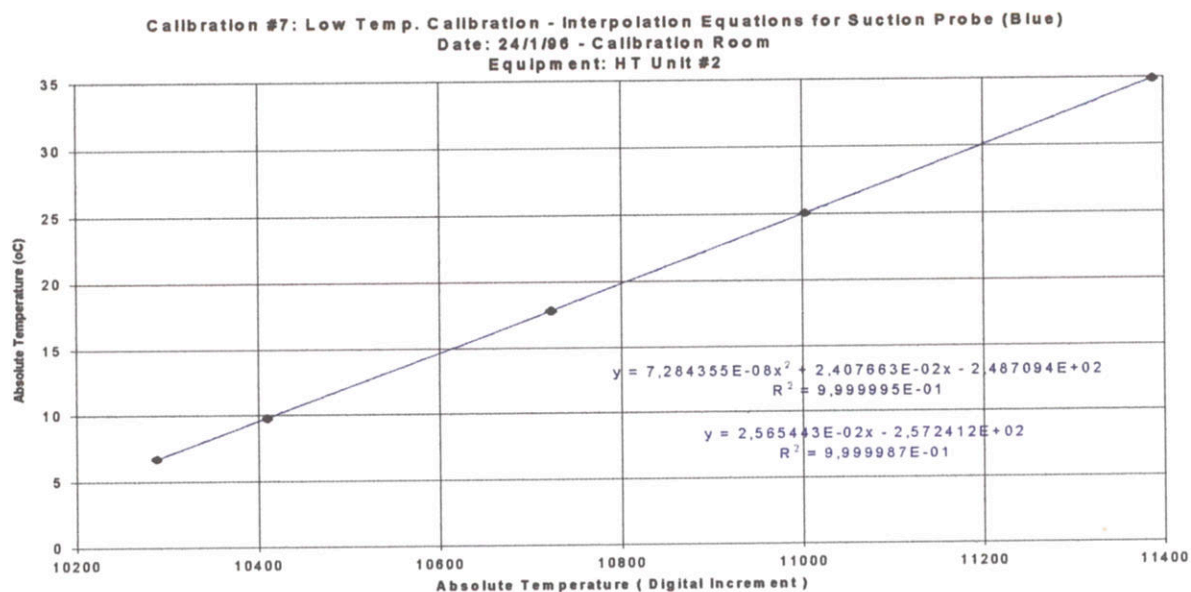


Figura 5-8

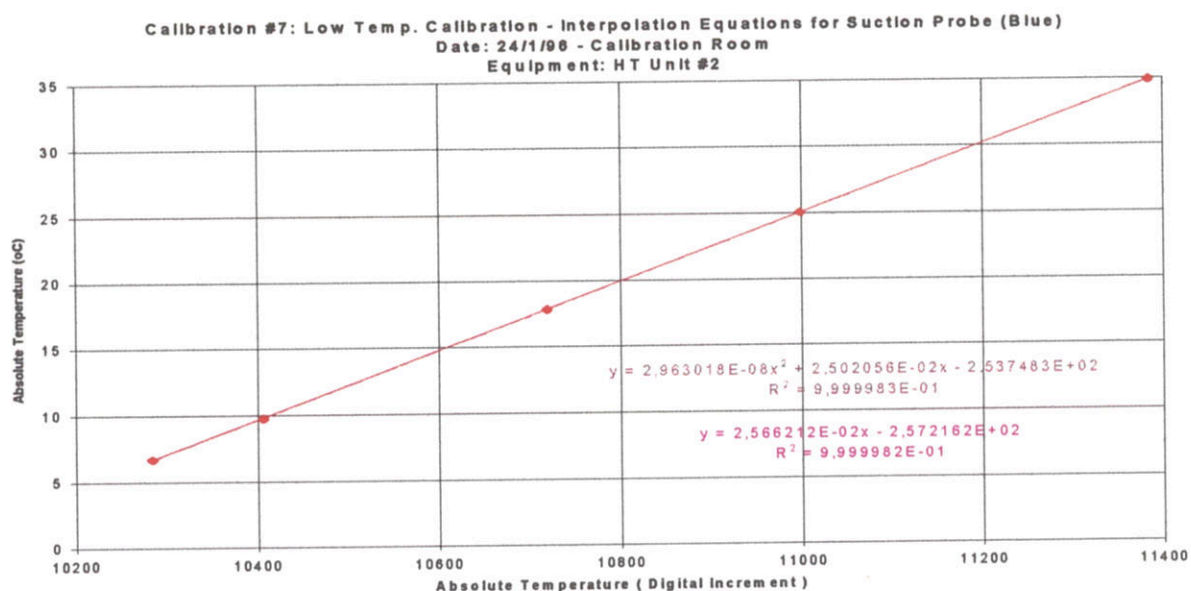
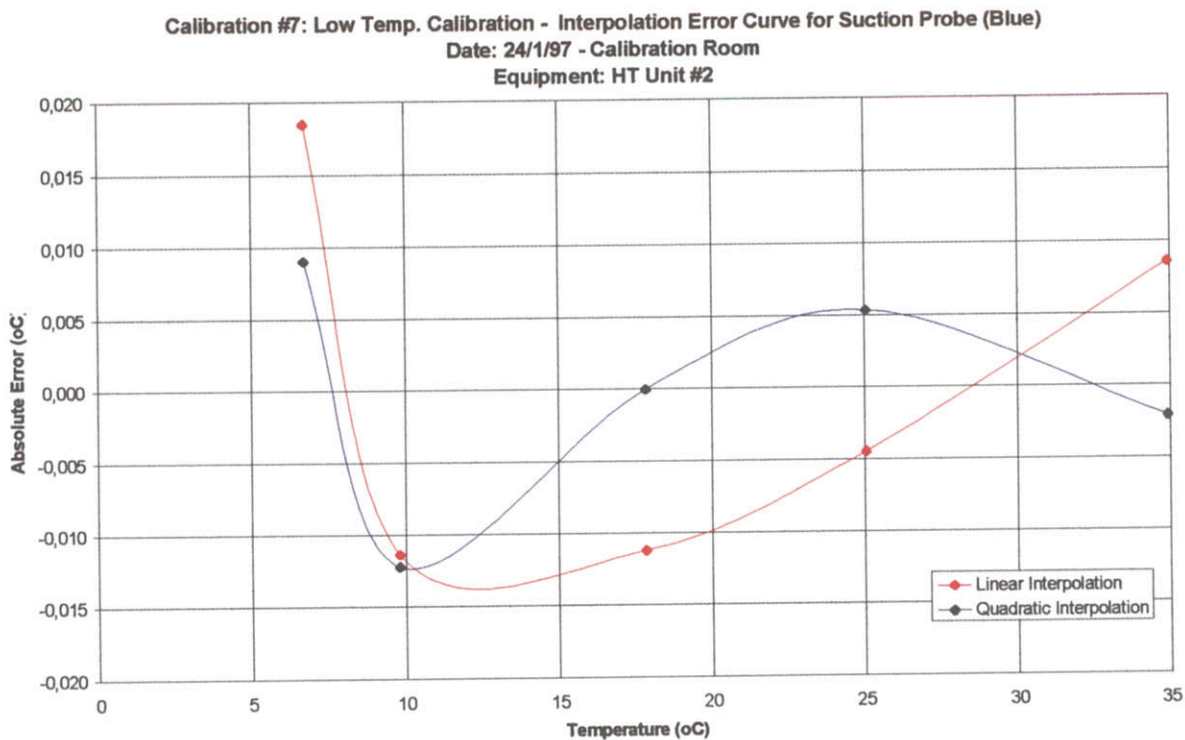
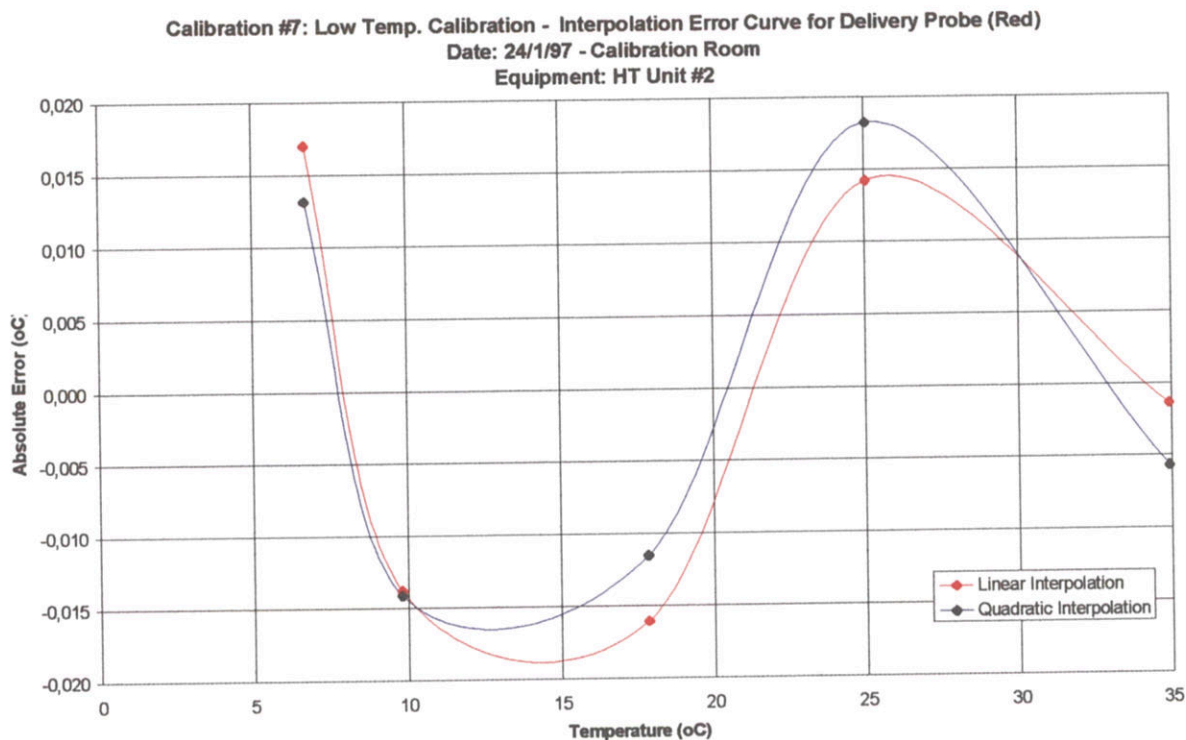


Figura 5-9

Destes verifica-se que para a faixa de operação até 35°C, tanto a interpolação quadrática quanto a linear podem ser utilizadas. A Figura 5-7 e Figura 5-8 mostram que os erros dos dois sensores não ultrapassam 0.020 °C.

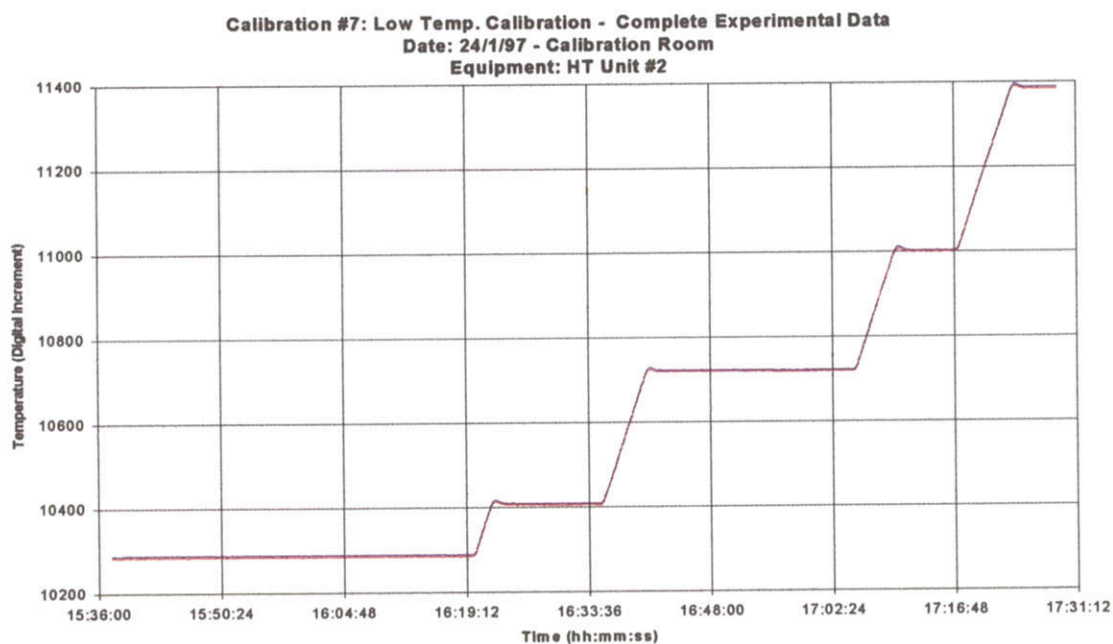


**Figura 5-10**

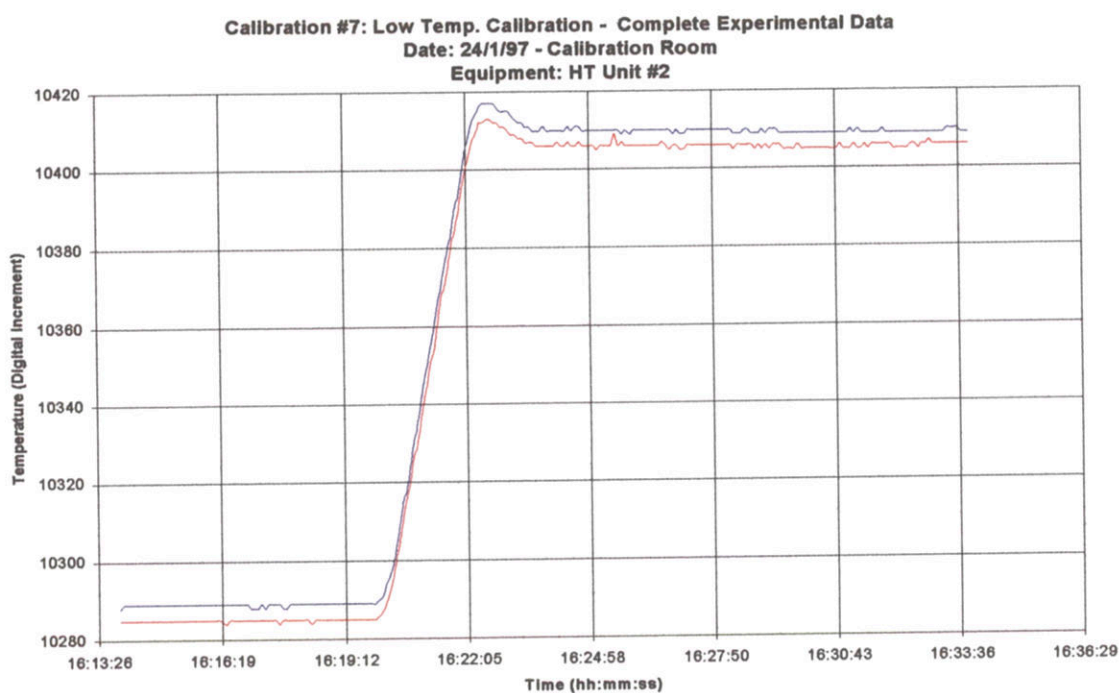


**Figura 5-11**

Se for analisado a resposta temporal da calibração, pode-se verificar que a diferença de canais existentes no circuito anterior ( Figura 5-12 e Figura 5-13), não se apresentam tão acentuadas na nova versão do circuito.



**Figura 5-12**



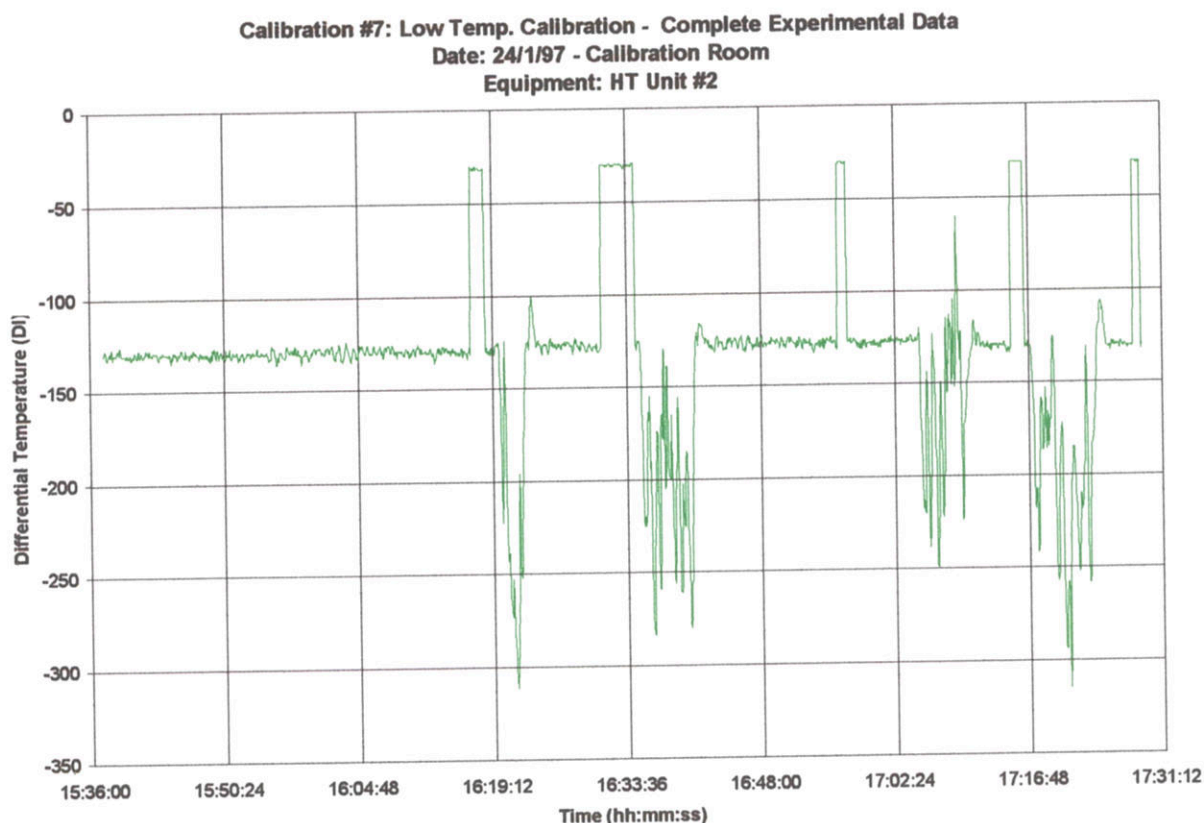
**Figura 5-13**



A resposta da temperatura diferencial é apresentada na Figura 4-14. Nesta, verifica-se que o valor de temperatura diferencial, quando não há alteração da temperatura, mantém-se constante em toda a faixa de medição utilizada. Os saltos existentes entre os dois patamares são causados pela modificação de uma chave, responsável por aumentar a faixa de operação através da redução da tensão de saída por resistores de precisão.

Deve-se expor que, na realização deste experimento, tomou-se o cuidado de colocar os sensores com a parte sensível em contato, posicionando a 20 cm de profundidade, exatamente no centro do fluxo de água no interior do banho. Sem este cuidado, o resultado mostrado na Figura 5-15 pode ocorrer, em decorrência da instabilidade de um possível gradiente de temperatura formado no interior do tubo.

Para mostrar a repetibilidade desta característica, a Figura 5-16 mostra um experimento realizado no mês anterior, onde a mesma característica foi observada. Os patamares são causados pela mudança de faixa de operação através de um chave instalada no painel traseiro.



**Figura 5-14**

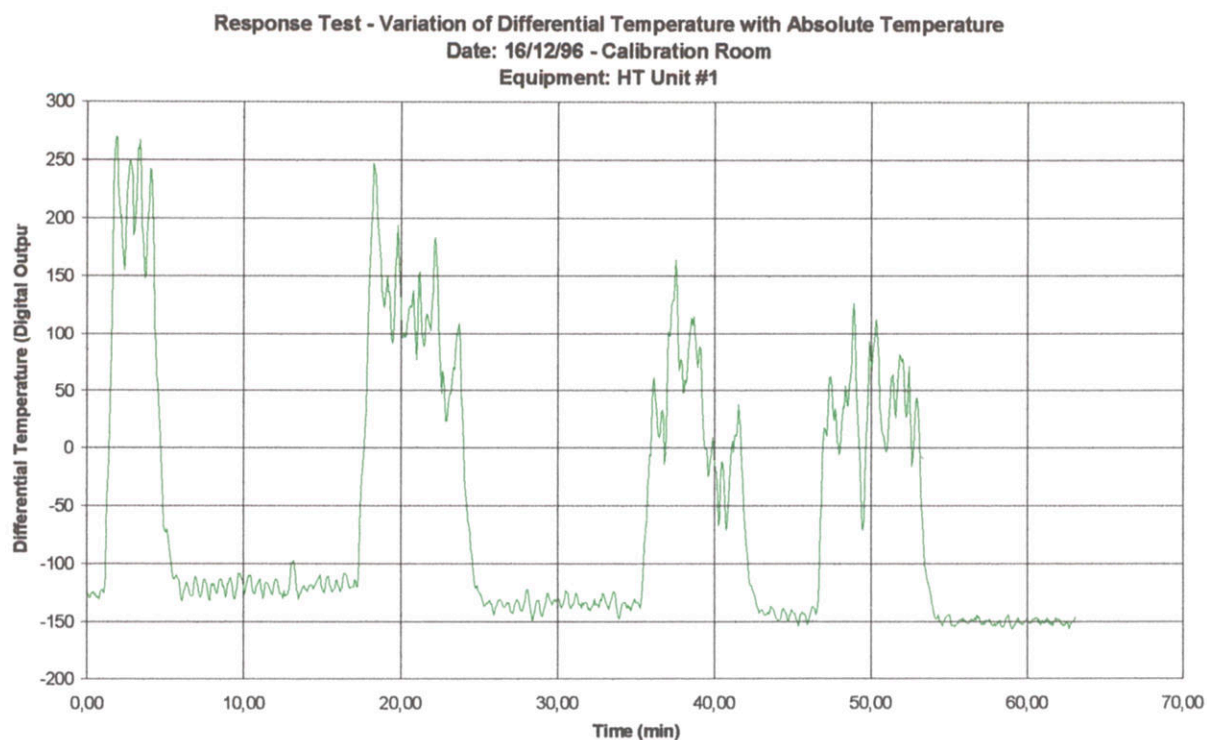


Figura 5-15

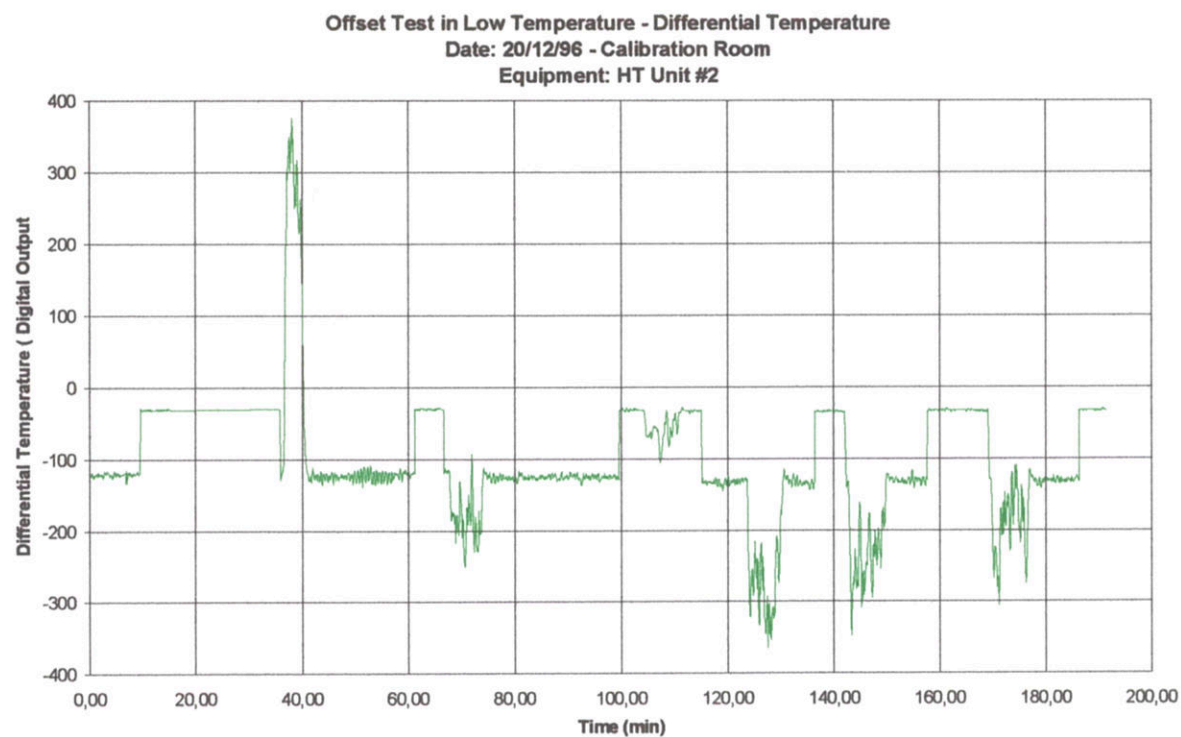


Figura 5-16

### 5.2.1.3 Ponte de Wheatstone

Realizou-se também o ensaio de calibração da ponte de Wheatstone. A Figura 5-17 e Figura 5-18 expõem as calibrações obtidas.

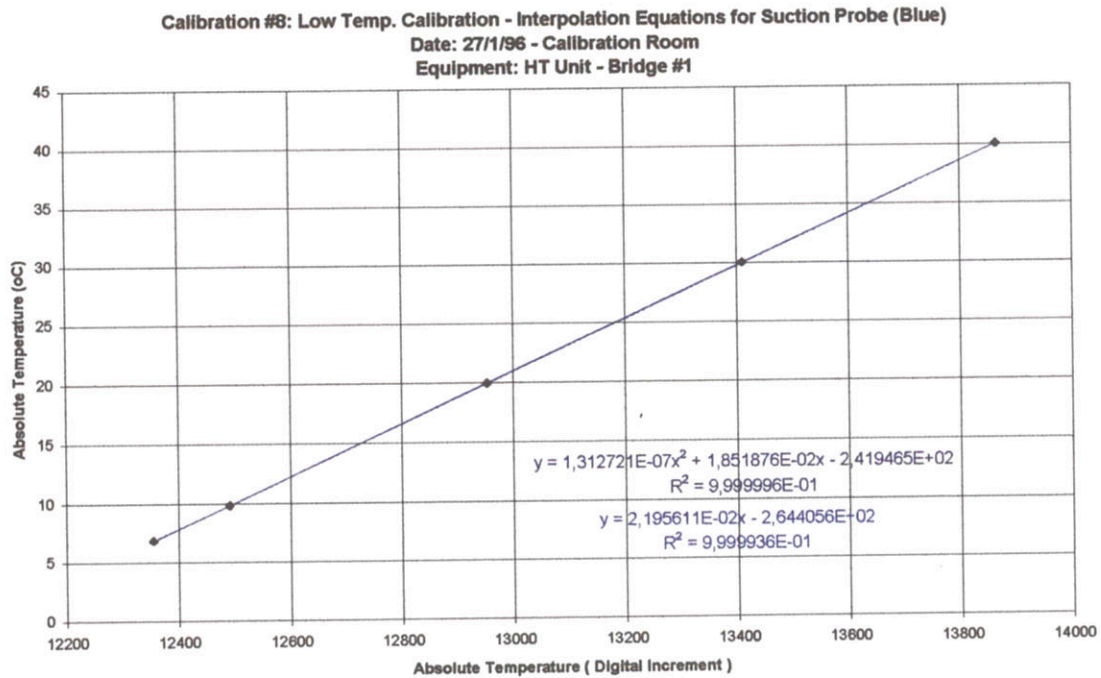


Figura 5-17

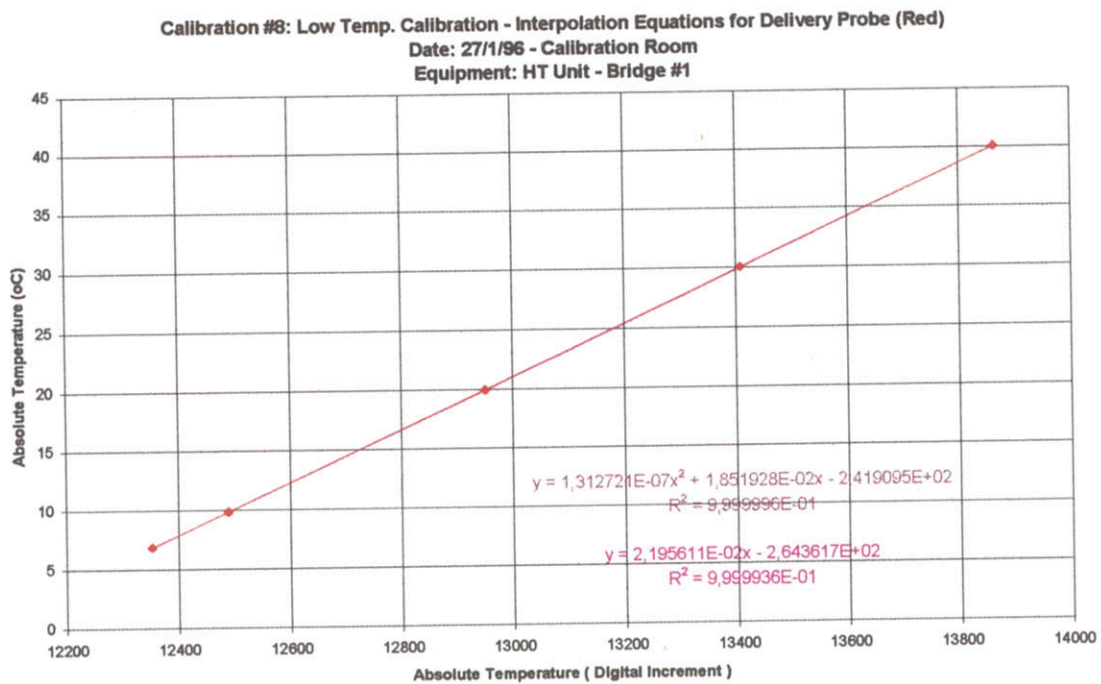
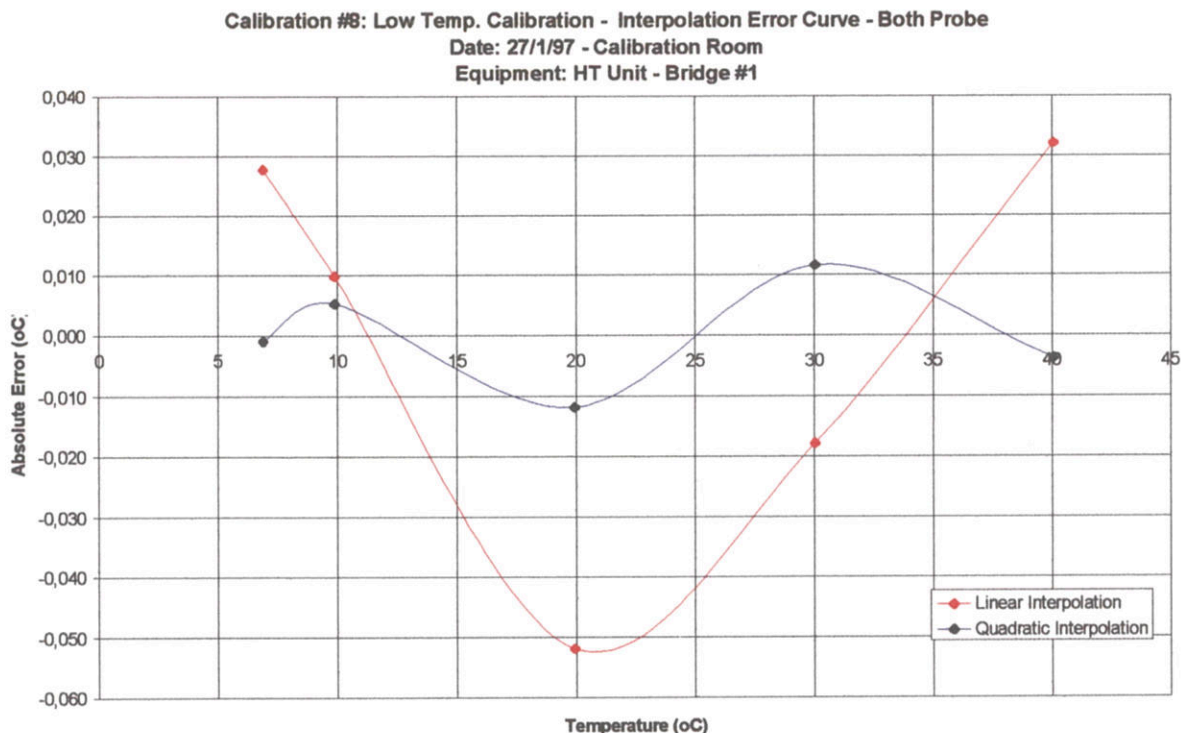


Figura 5-18



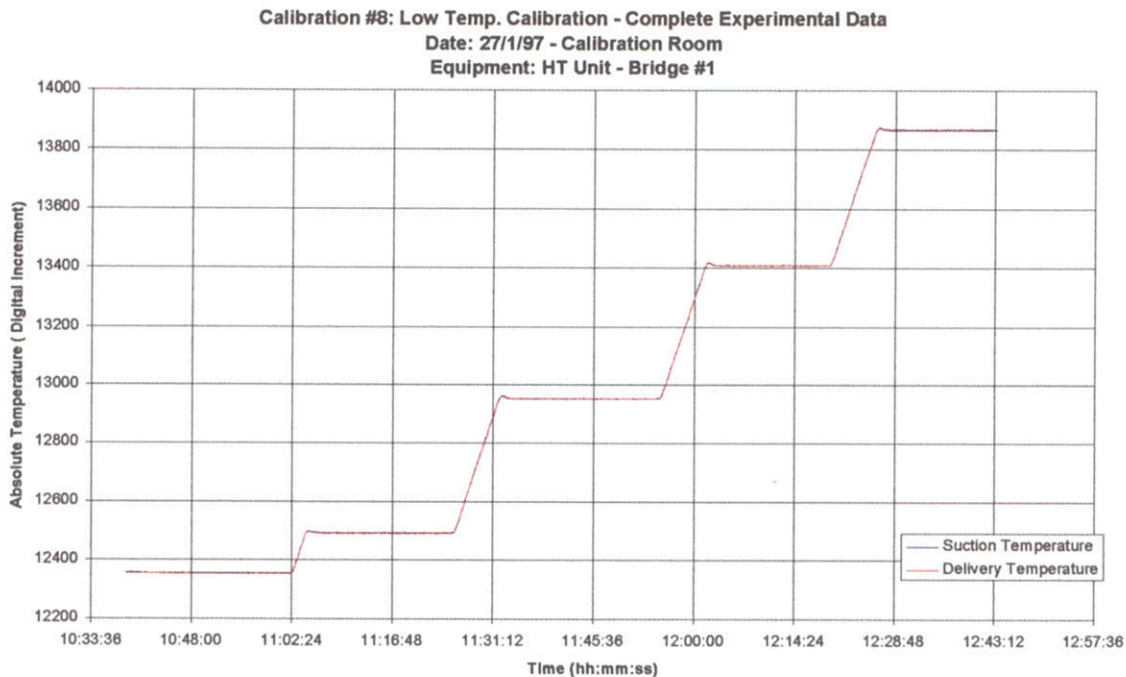
Pode-se verificar que as equações possuem características muito parecidas entre os dois sensores, se comparados os coeficientes. Observando os erros de linearidade do sistema, obtém-se a seguinte curva para ambos os sensores ( Figura 5-19 ).



**Figura 5-19**

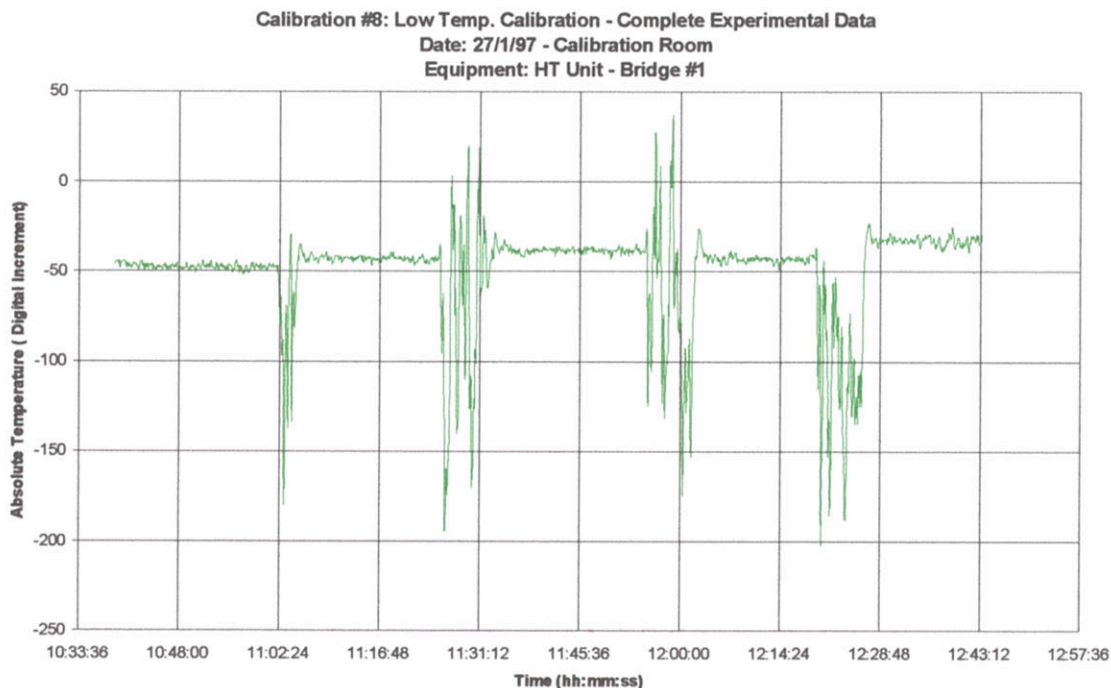
Este resultado ocorreu devido à grande similaridade existente entre os valores de temperatura absoluta dos sensores, onde o erro entre canais ficou entre  $\pm 3$  incrementos digitais máximos.

A Figura 5-20 ilustra a resposta no tempo dos sensores. Deve-se destacar a similaridade existente entre os sensores, chegando a confundir as linha de temperatura algumas vezes.



**Figura 5-20**

Com relação à temperatura diferencial (Figura 5-21), verifica-se que esta varia ao longo da faixa de operação do sistema. Entretanto, esta mantém-se constante enquanto a temperatura permanece a mesma. Devido a esta característica, a opção de fonte de corrente mostrou-se mais estável e, em consequência, teve preferência nos demais testes realizados.



**Figura 5-21**

## 5.2.2 - Calibração em alta temperatura

Este experimento teve o objeto de determinar os parâmetros para medição em alta temperatura. Para obter estes resultados, contratou-se os serviços de A. J. Thermosensors, localizados em UK. O sistema utilizado possuía as seguintes características:

Blocos de Calibração :

1. *Isotech* 'Medusa'

2. *Joffra* D55E

Termômetro padrão utilizado:

**Sensor PT100**, Nº de calibração N.A.M.A.S. 1532E e 1533E com  $\pm 0.15^\circ\text{C}$  de incerteza.

**Indicador Tempmaster digital temperature**, Nº de calibração N.A.M.A.S. 11594 com  $\pm 0.04^\circ\text{C}$  de incerteza de medição.

O resultado da calibração pode ser verificado na Figura 5-22 e Figura 5-23.

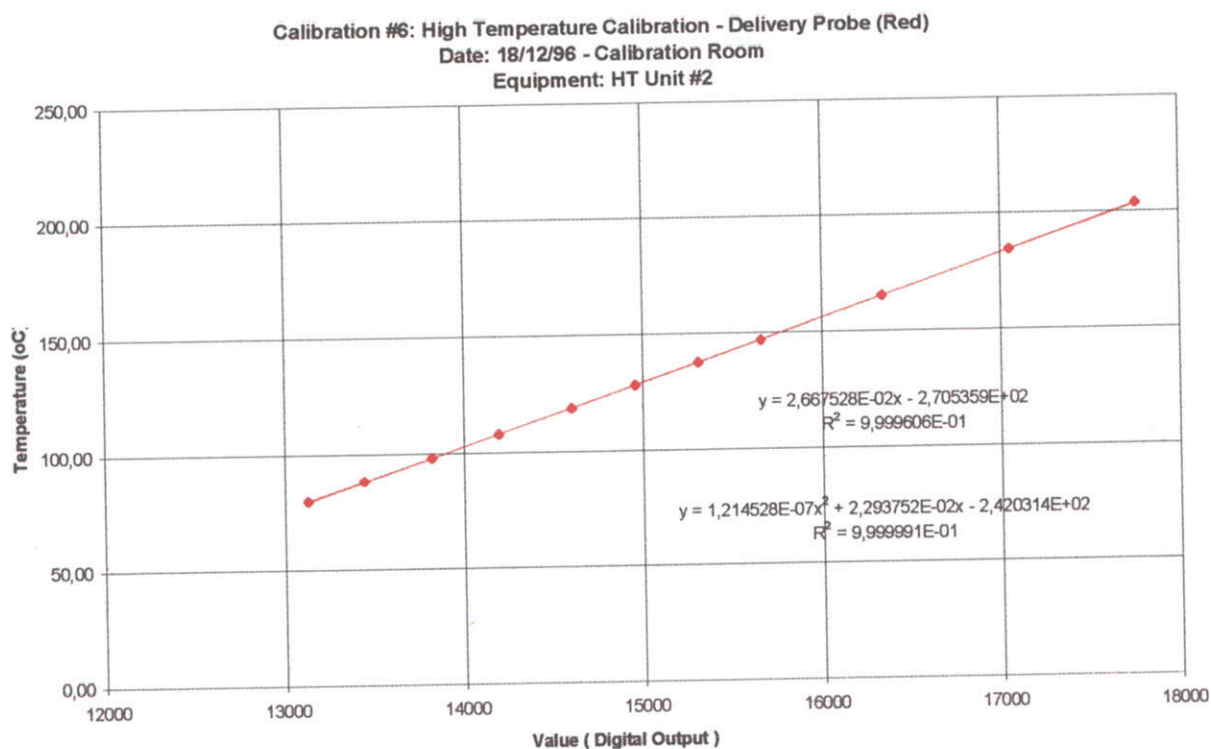
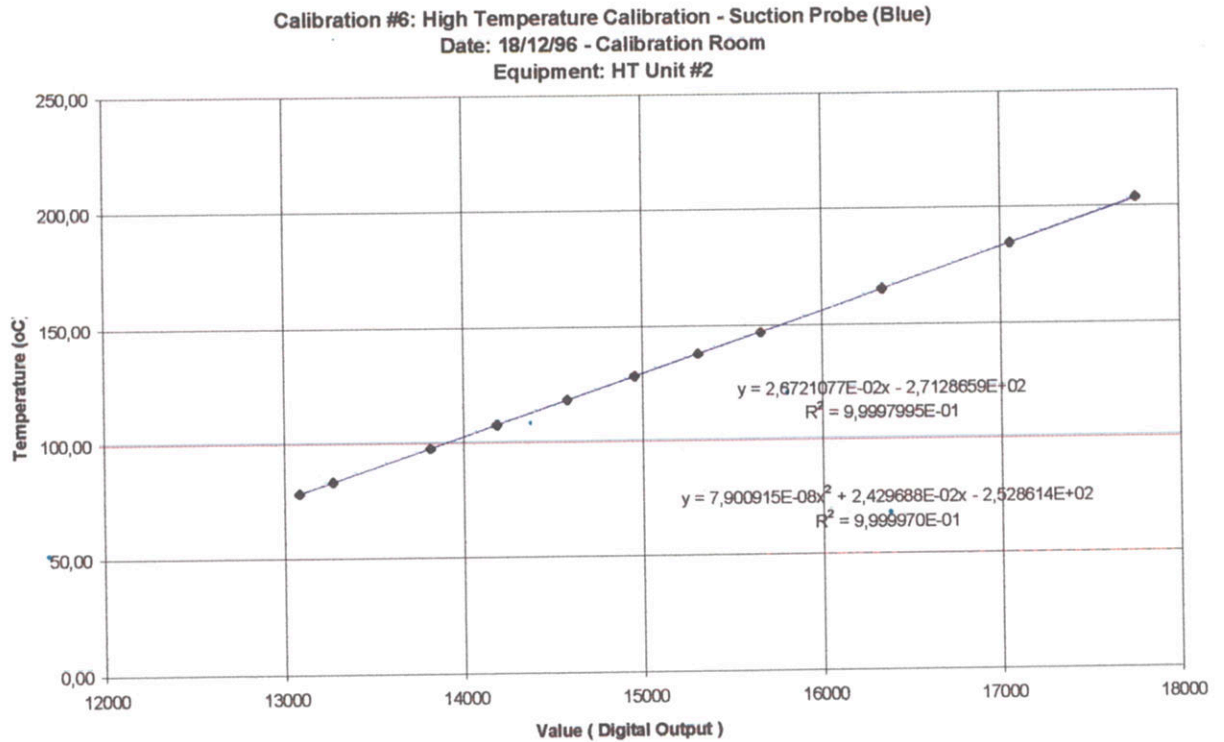


Figura 5-22





**Figura 5-23**

Analisando-se as equações, nota-se que a interpolação quadrática tem um melhor ajuste em relação a linear. Esta característica fica melhor visualizada na Figura 5-24 e Figura 5-25, onde o somente o uso de interpolação quadrática permite atingir erros de linearidade inferiores a 0.1 °C.

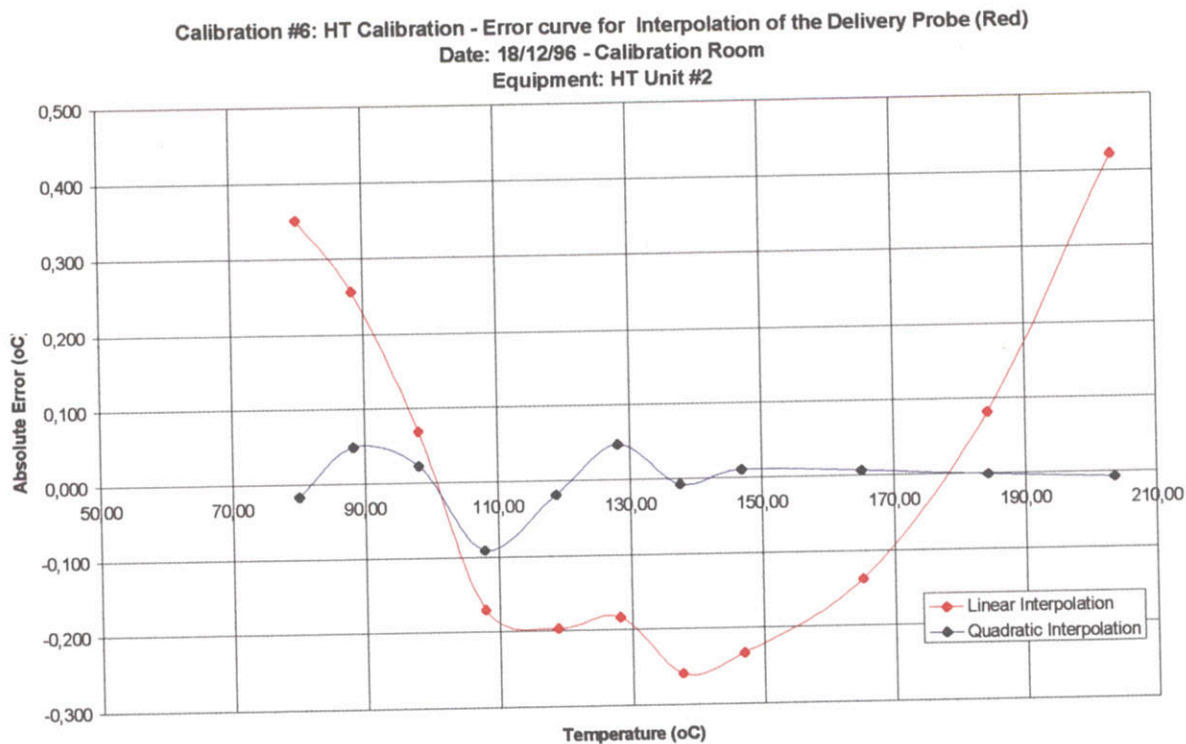


Figura 5-24

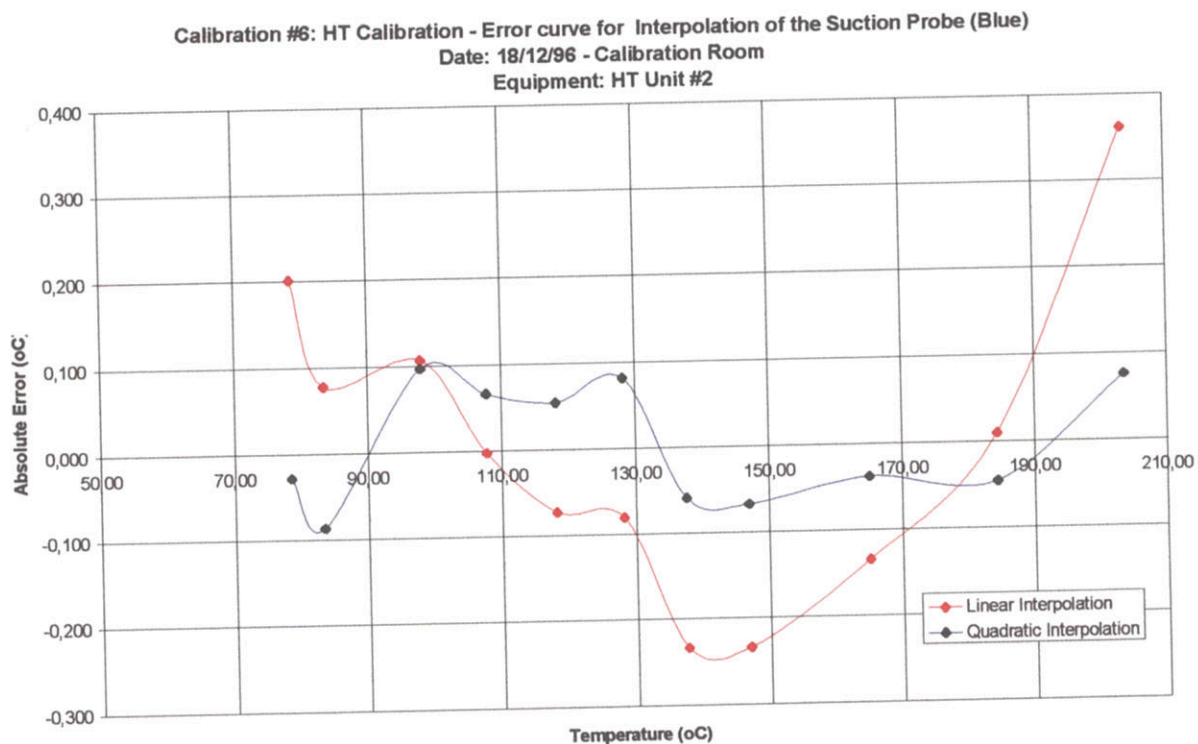


Figura 5-25

No anexo IV está disponível uma tabela contendo os valores de correção necessários para calibrar o equipamento para alta temperatura.

O teste também se mostrou importante para acompanhar a resposta dos sensores em relação a temperatura diferencial. A utilização de dois blocos de calibração possibilitou a geração de uma temperatura diferencial. Entretanto, devido a um problema de calibração da placa de alimentação, ocorreu a saturação dos amplificadores em determinados pontos.

Da Figura 5-26 a Figura 5-33 apresentam os resultados do ensaio realizado, devendo-se comentar que:

1) Na Figura 5-26 e Figura 5-27, os sensores estavam colocados em diferentes blocos de temperatura. Posteriormente, a temperatura foi elevada em passos até a troca de posição entre os blocos. A temperatura diferencial apresentou saturação a partir de 10:46;

2) Na Figura 5-28 e Figura 5-29, apresentam-se uma mudança de posição entre blocos de calibração. Nota-se que o tempo de resposta do sistema para 90% está inferior a 1.5 min para o bloco de calibração;

3) Na Figura 5-30 e Figura 5-31 apresentam o ponto de correção para tensão diferencial;

4) Na Figura 5-32 e Figura 5-33 ambos os sensores foram colocados no mesmo bloco. As respostas foram bastante similares, entretanto obteve-se uma resposta diferencial, com bastante variação de valor.



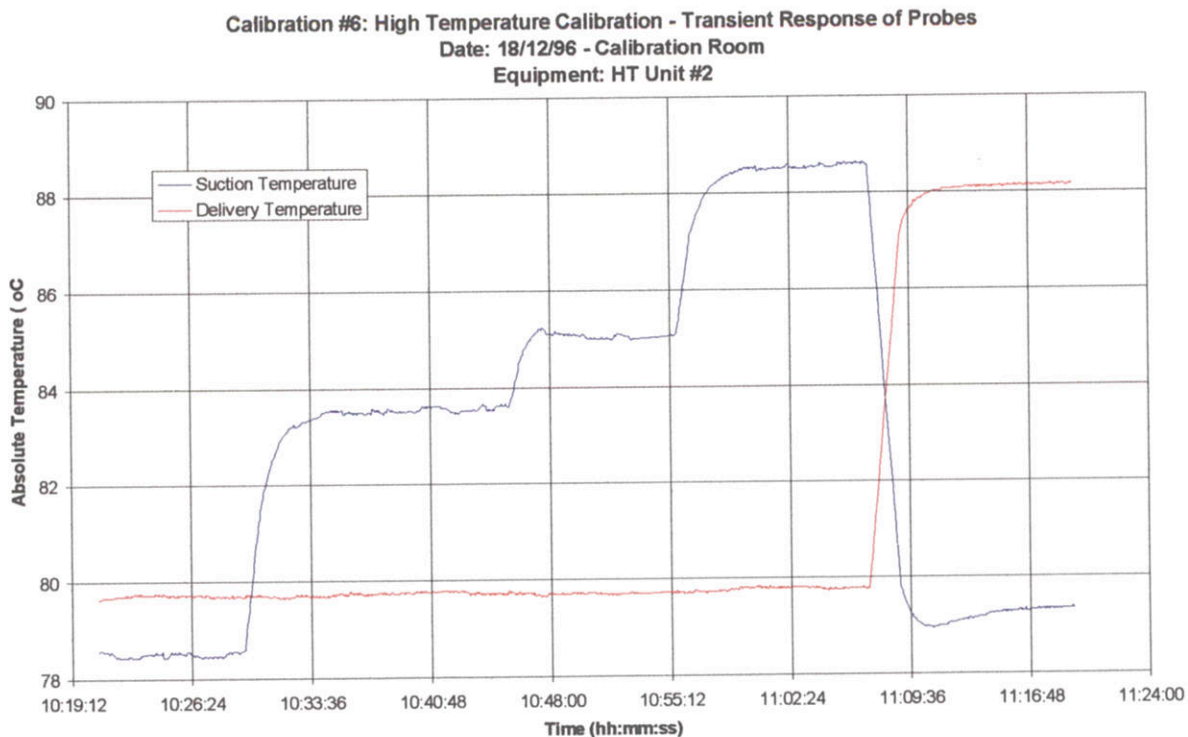


Figura 5-26

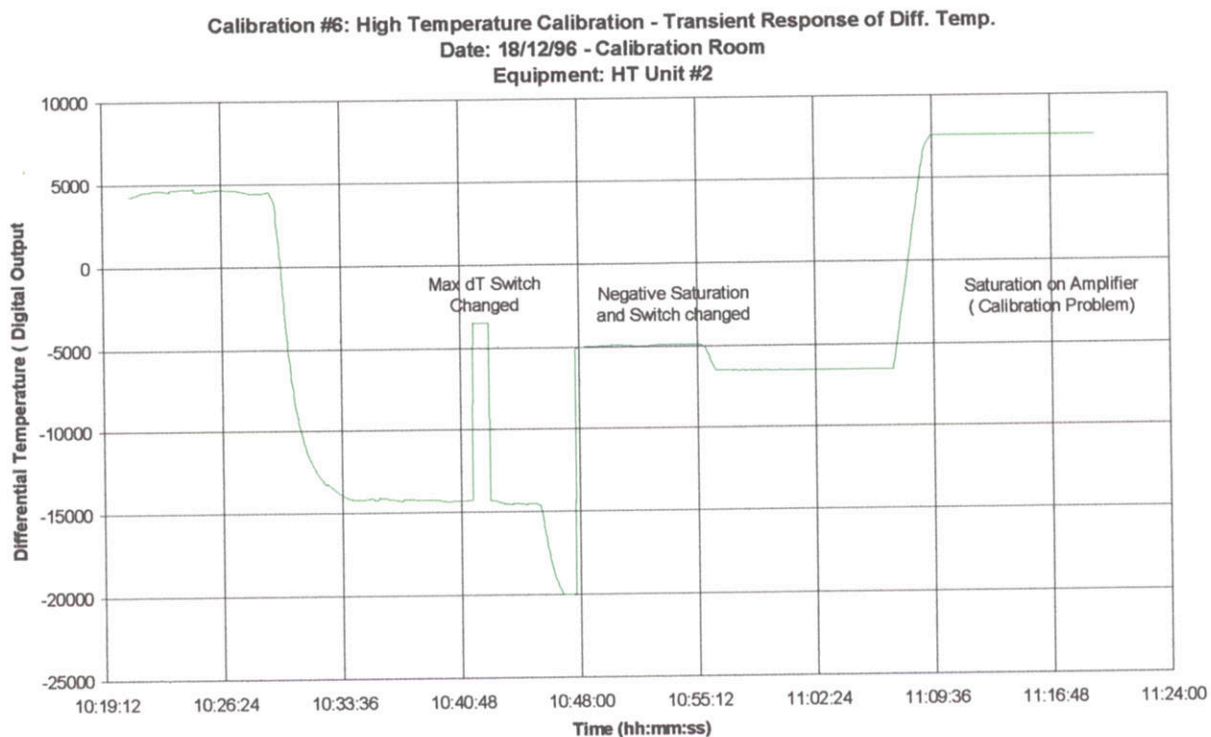
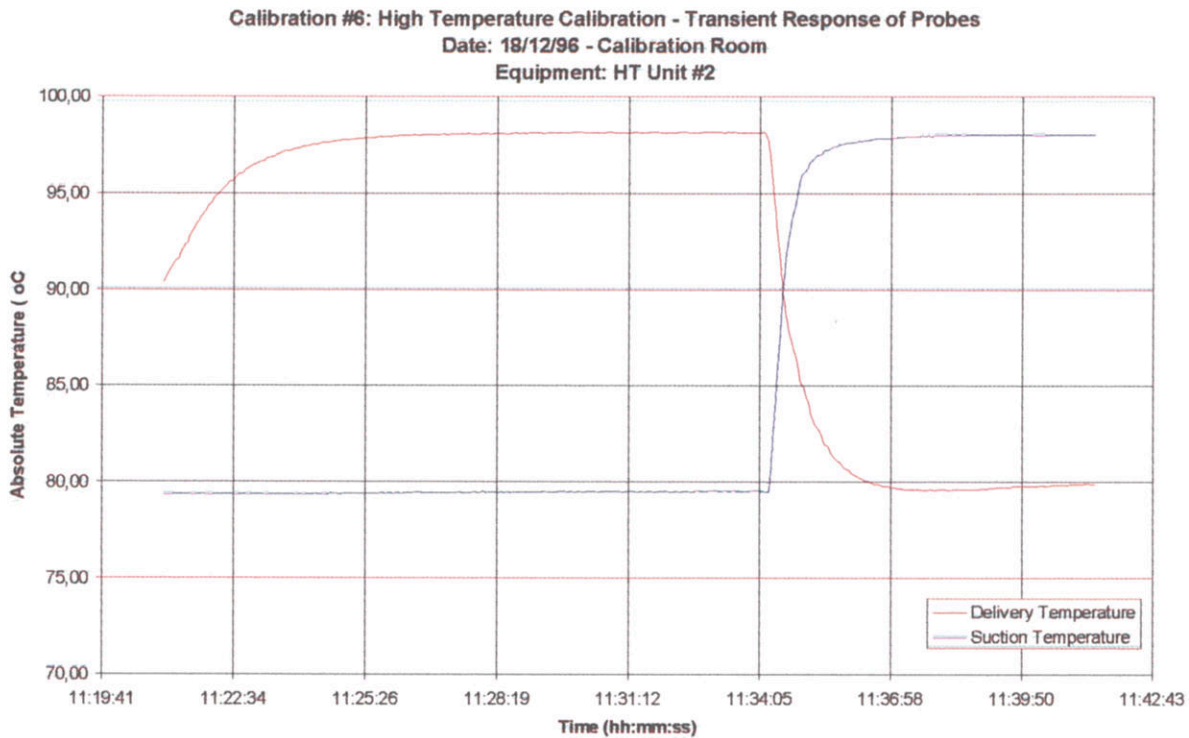
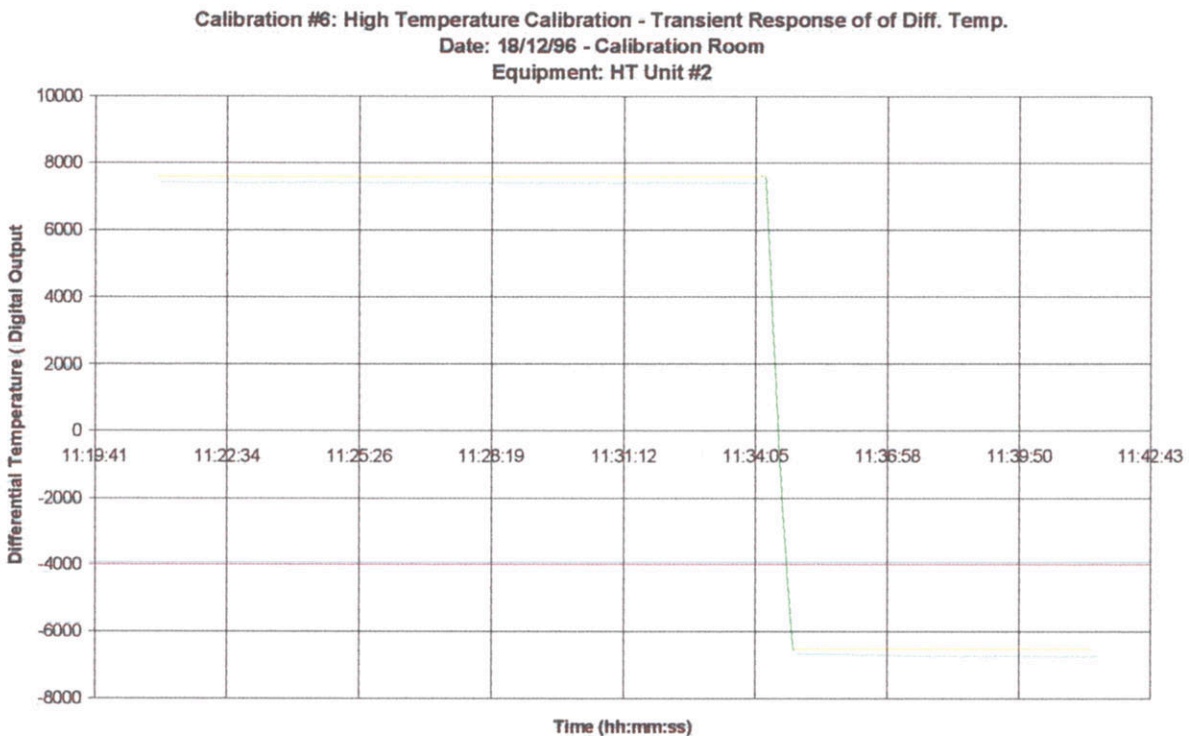


Figura 5-27



**Figura 5-28**



**Figura 5-29**

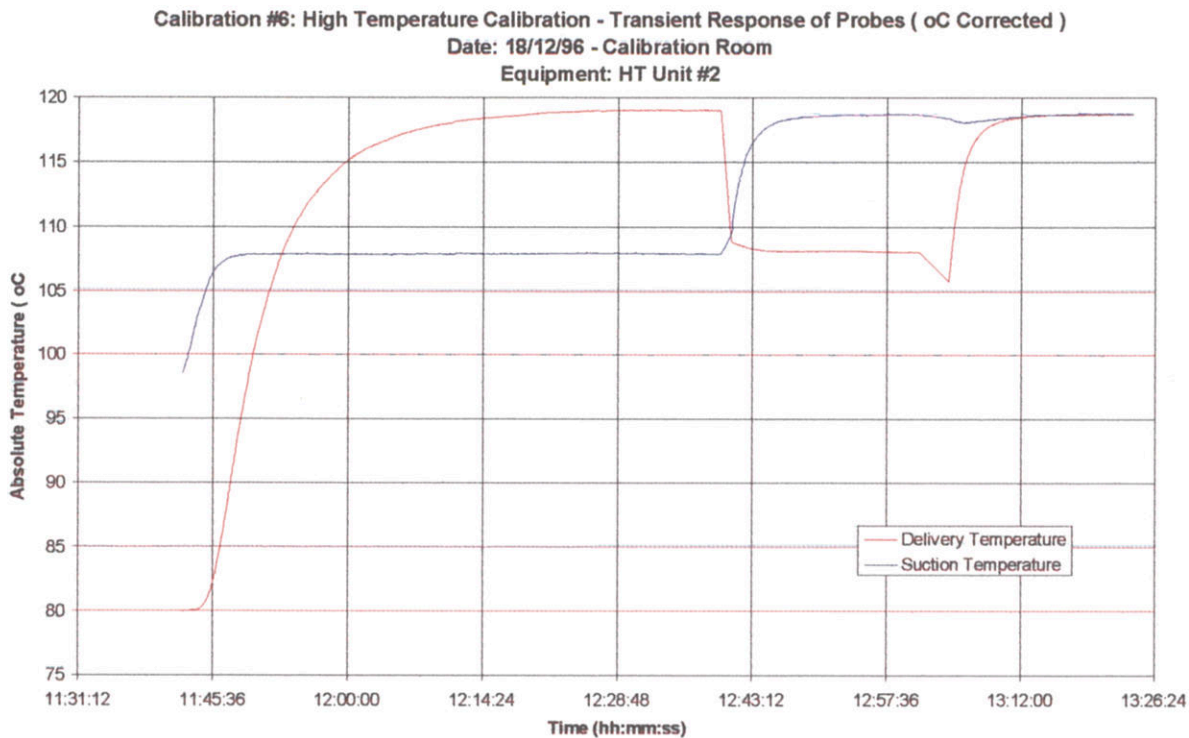


Figura 5-30

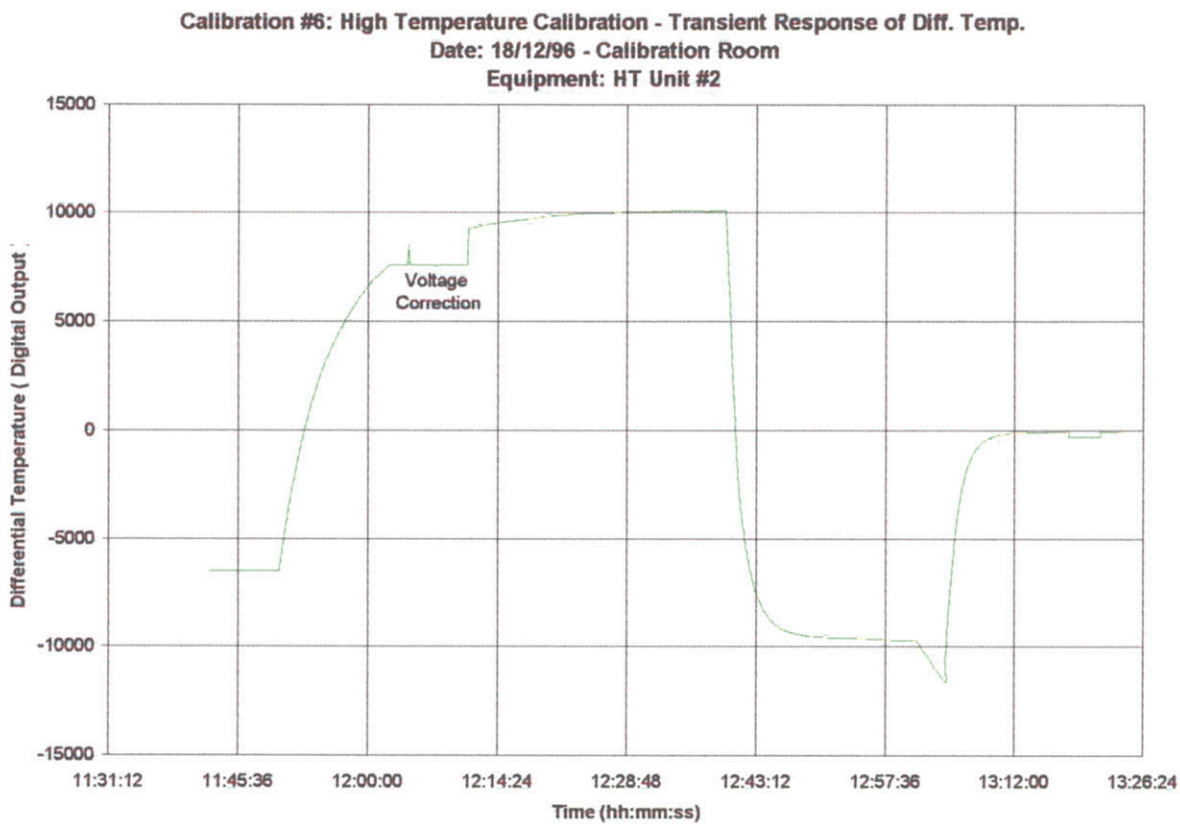


Figura 5-31



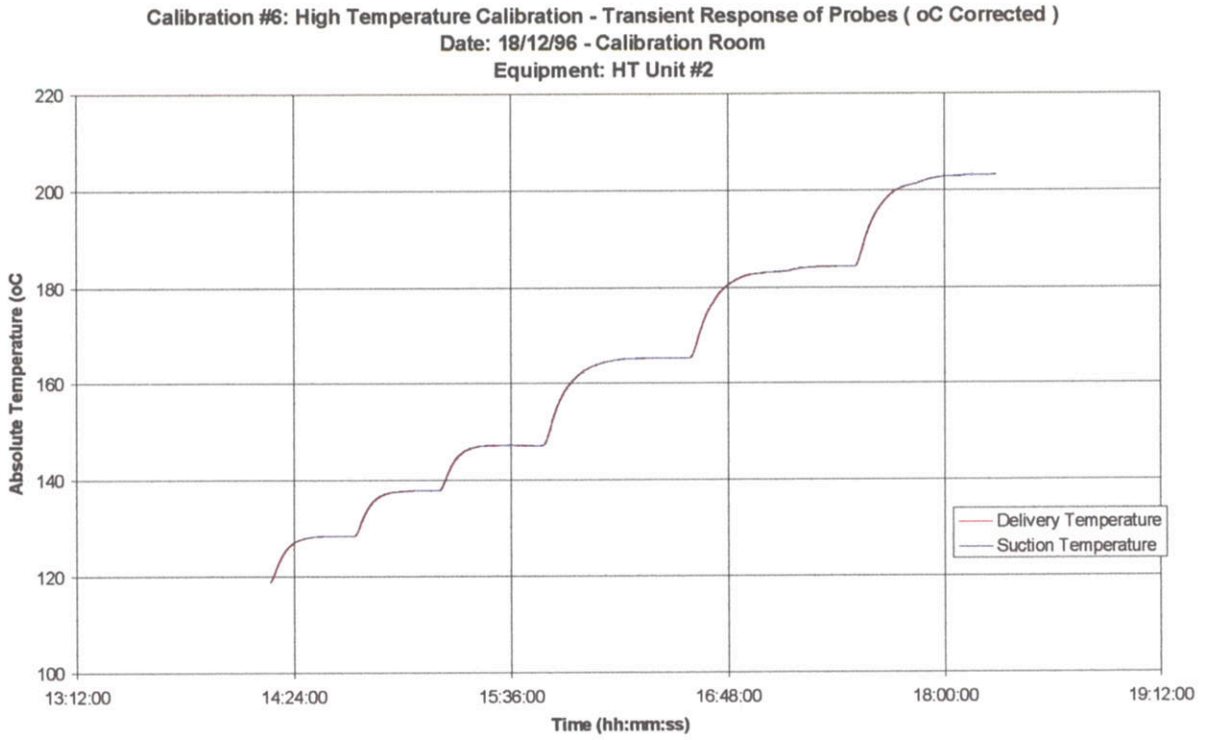


Figura 5-32

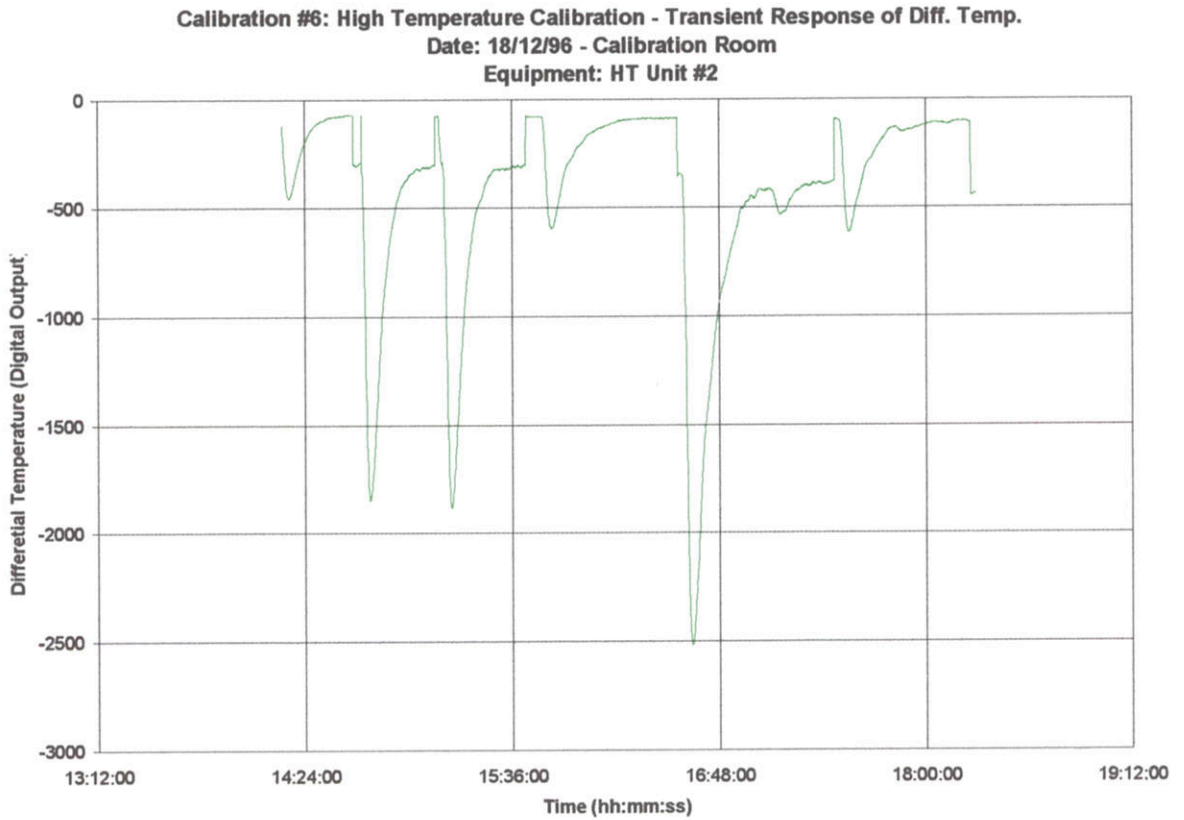


Figura 5-33

### 5.3 - Teste de resposta utilizando pontos fixos de temperatura

Estas observações consistiram em utilizar pontos conhecidos de temperatura para verificar a resposta do sistema.

#### 5.3.1 - Ponto de evaporação da água

Compreendeu na utilização de aquecedor elétrico de água. O resultado pode ser verificado na Figura 5-34 e Figura 5-35. Nota-se que quando a temperatura atingiu o ponto de evaporação da água, a indicação de temperatura diferencial permaneceu constante. Isto vai ao encontro de resultados encontrados na calibração.

Este teste foi repetido mais algumas vezes, obtendo valores que variam entre 99.75°C a 100.10°C( Figura 5-36 e Figura 5-37). Esta variação supõem-se ser causada por não ser possível submergir toda a parte sensível no fluido. Neste experimento foram utilizados os coeficientes obtidos da calibração em alta temperatura .

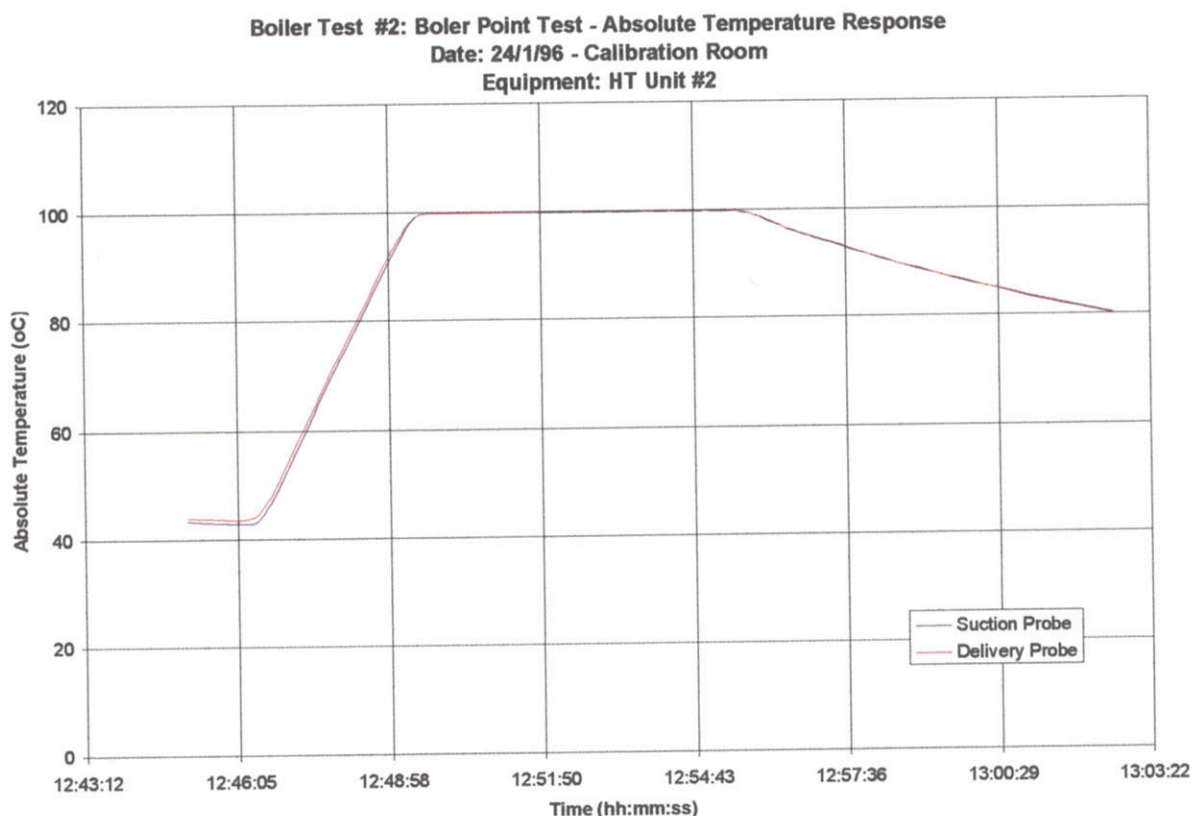


Figura 5-34

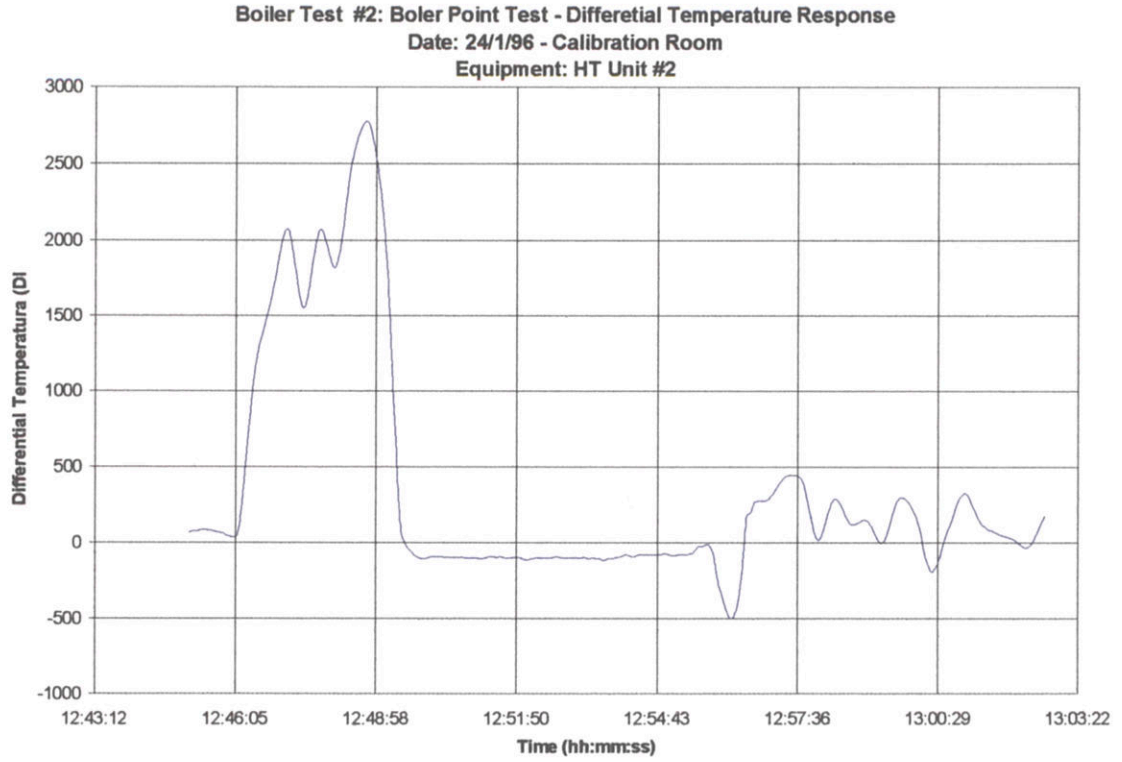


Figura 5-35

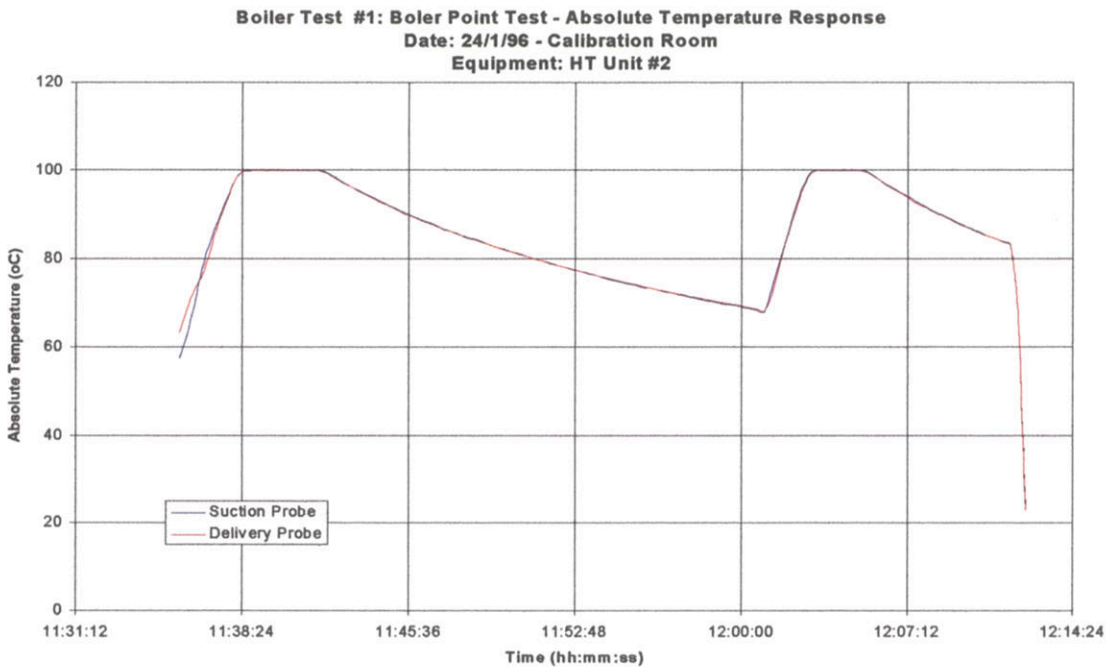
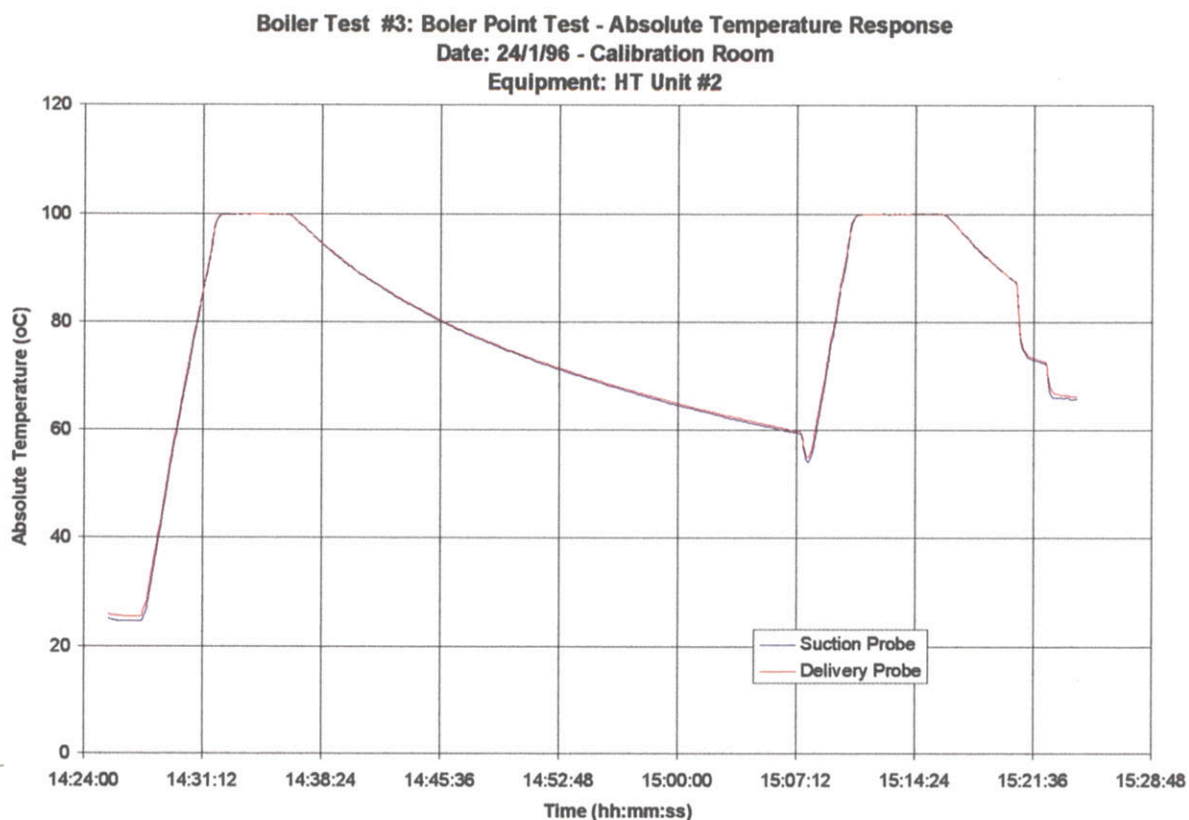


Figura 5-36





**Figura 5-37**

### 5.3.2 - Ponto Triplo da Água

Este teste consistiu em colocar um sensor imerso em um recipiente térmico com água e gelo, sendo o outro colocado em um valor de temperatura obtida no banho.

A resposta para este experimento está exposta na Figura 5-38 e Figura 5-39. Nesta pode-se verificar que a medição de temperatura para o ponto triplo apresentou uma repetibilidade menor que  $\pm 0.07$  °C para valor absoluto. Na medição de temperatura diferencial pode-se observar a oscilação de 15 mK decorrentes do sistema de controle da temperatura do banho ( Figura 5-40 ).

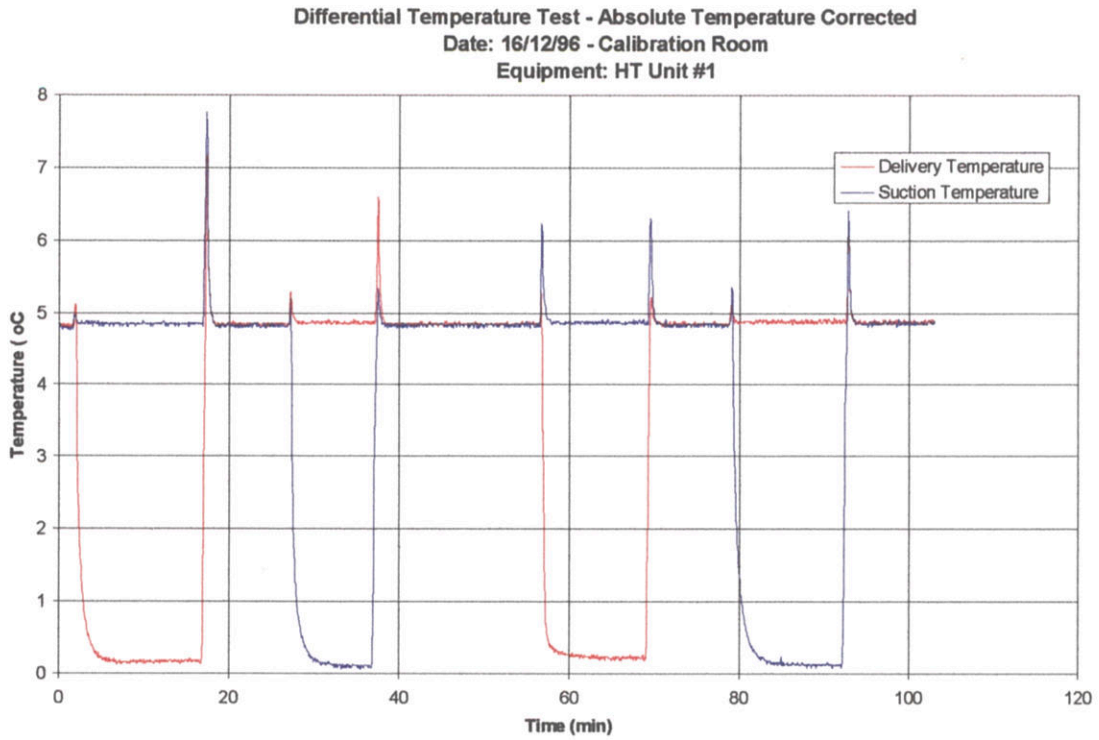


Figura 5-38

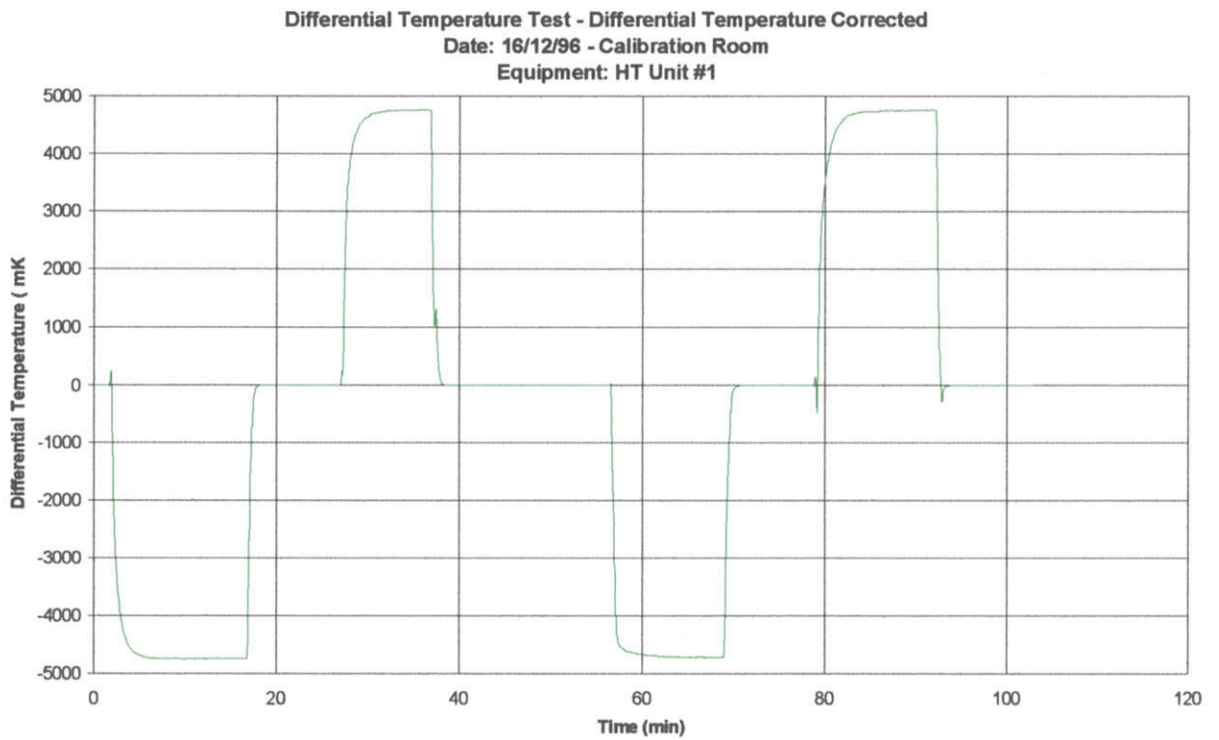


Figura 5-39

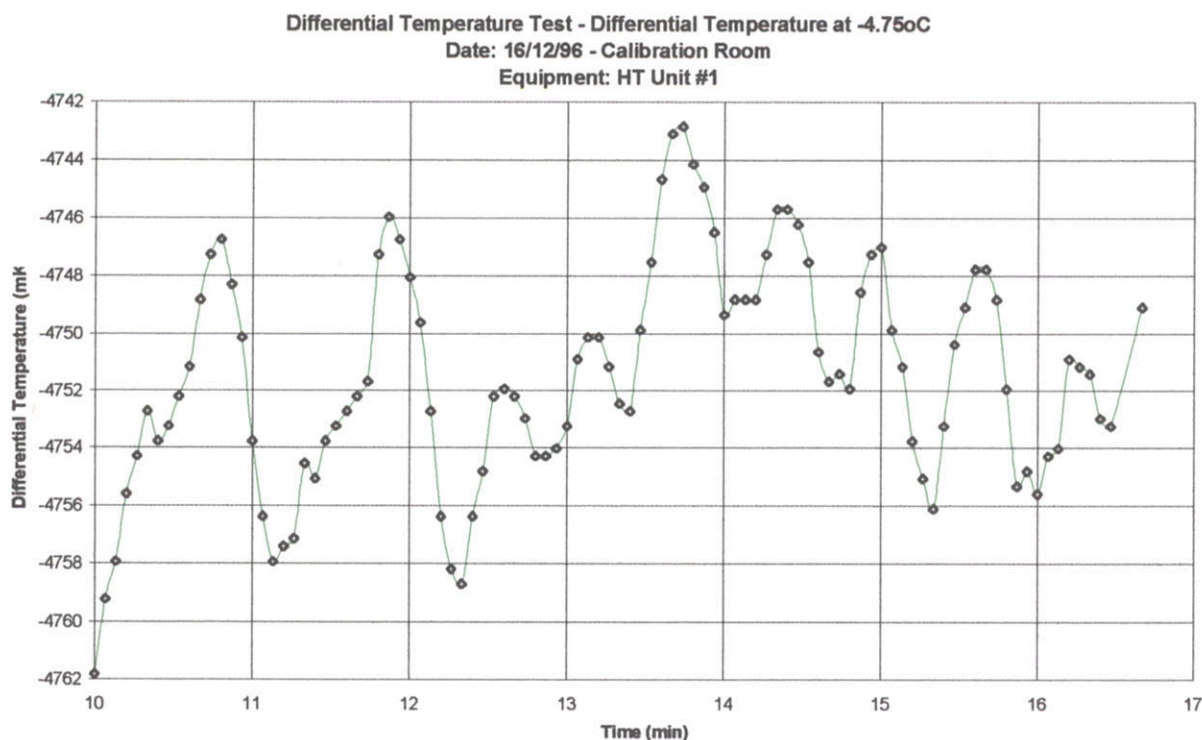


Figura 5-40

#### 5.4 - Calibração de temperatura diferencial através do Calorímetro de Estrangulamento

Segundo a bibliografia [The Pump Test 95] é possível calibrar a medição de temperatura diferencial utilizando um princípio chamado Throttle Calorimeter (Calorímetro de Estrangulamento). A Figura 5-41 ilustra o princípio de construção.

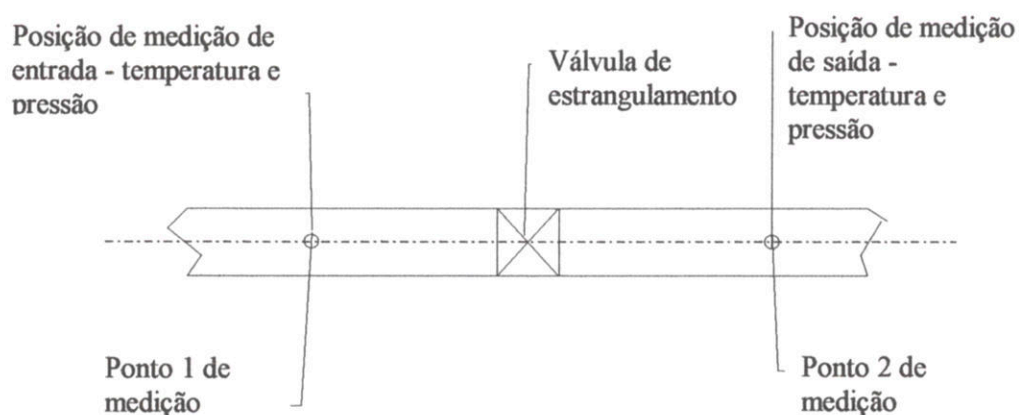


Figura 5-41- Calorímetro de Estrangulamento



Como não existe transferência de energia para o fluido, a equação 2.11 se transforma em:

$$E_m = \bar{a}(p_2 - p_1) + \bar{C}_p(\Theta_2 - \Theta_1) + \frac{U_2^2 - U_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) + \Delta E_M = 0$$

Se o calorímetro é bem isolado e se a seção de teste é horizontal e os diâmetros das canalizações de entrada e saída são de iguais diâmetros,  $\Delta E_m$  é zero,  $z_1$  é igual a  $z_2$  e  $U_1$  é igual a  $U_2$ . Sob estas condições, tem-se:

$$(\Theta_2 - \Theta_1) = \frac{\bar{a}}{\bar{C}_p}(p_2 - p_1) \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (5-1)$$

Uma vez que  $p_1$ ,  $p_2$  e  $\Theta_1$  são medidos, a temperatura diferencial pode ser calculada e comparada com os valores de medição.

#### 5.4.1 - Utilização da válvula como calorímetro de estrangulamento

Devido aos diversos problemas ocorridos na tentativa de obtenção do calorímetro de estrangulamento, optou-se pela utilização do sistema de teste existente na própria empresa. O sistema é mostrado na Figura 5-42.

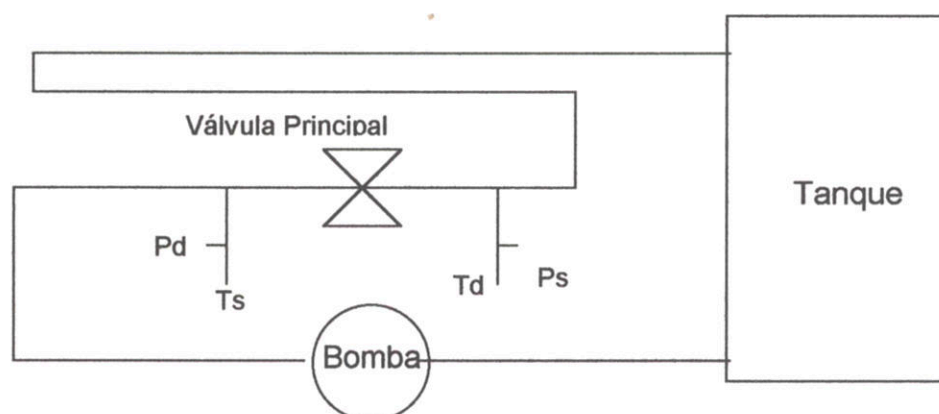


Figura 5-42

O teste consiste em :

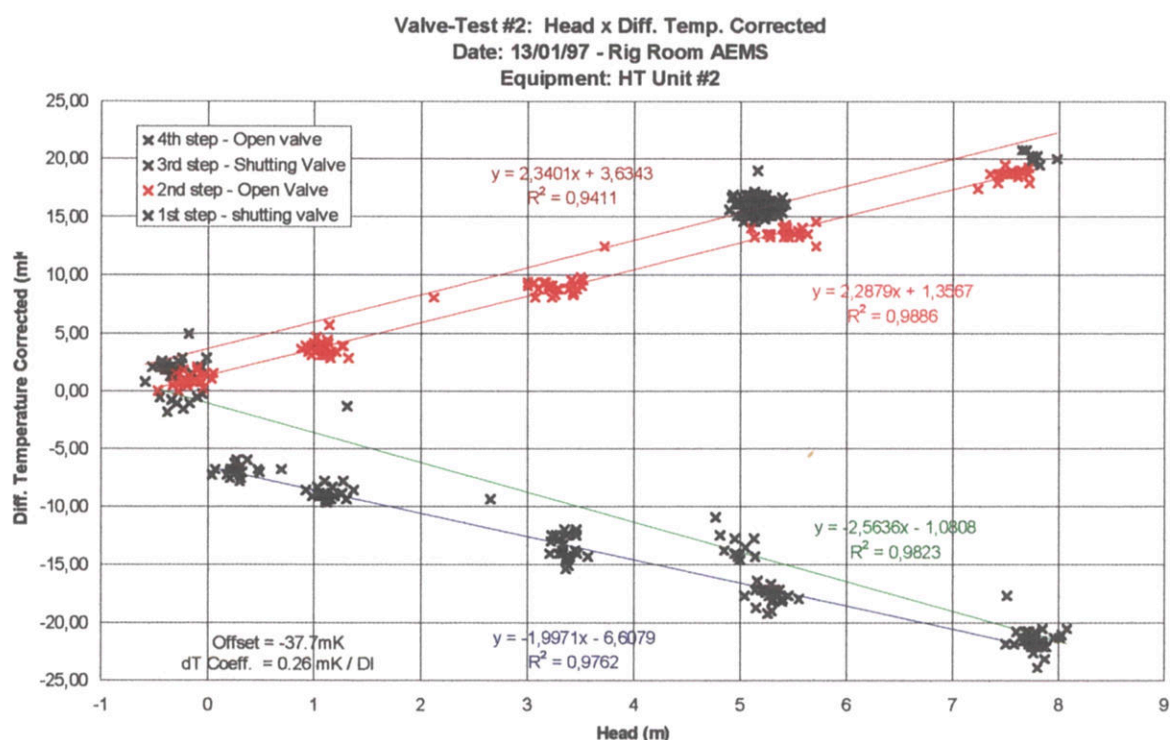
1. Com a válvula totalmente aberta, mede-se os valores de temperatura e pressão durante um tempo de aproximadamente 5 minutos, ao mesmo tempo que foi realizado o registro dos dados;

2. Fecha-se a válvula até atingir determinados pontos de estabilização e espera-se pela mesma. Após gravar os dados, outro ponto de fechamento da válvula até atingir o valor máximo requisitado pelo ensaio;

3. Ao finalizar a aquisição completa dos dados, troca-se os sensores de temperatura e repete-se o processo descrito em 2, mas agora abrindo-se a válvula;

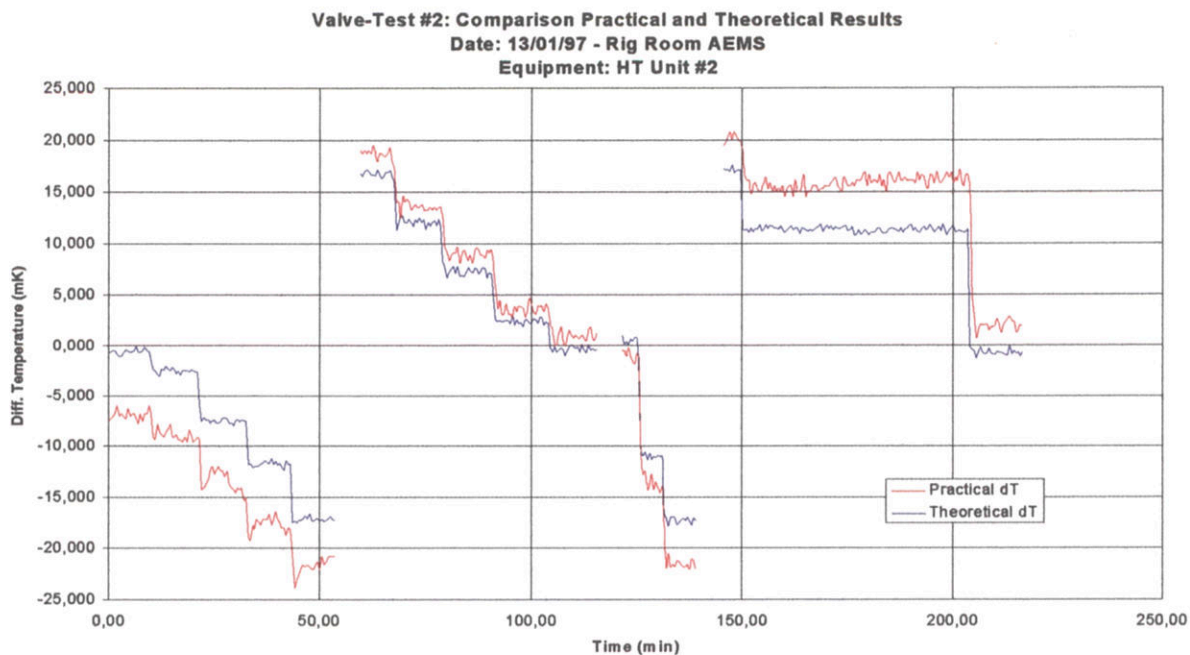
4. Repete-se os passos 2 e 3 para determinar a repetibilidade do instrumento;

Um dos primeiros testes realizados podem ser visualizados na Figura 5-43.



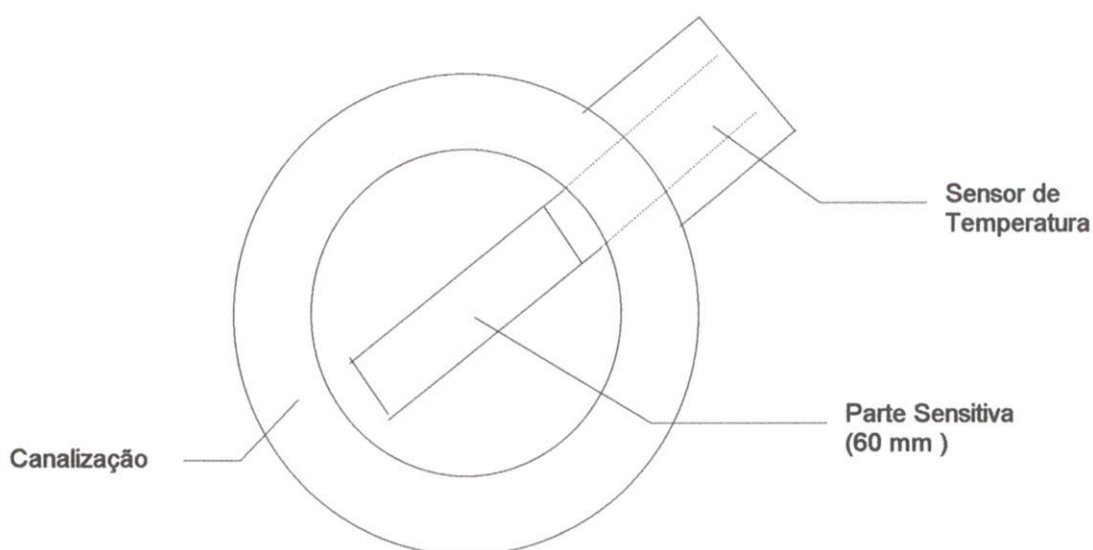
**Figura 5-43**

Este teste mostra que, apesar de possuir os valores proporcionais a pressão, o sistema não possui repetição de resultados. Se comparado com os valores teóricos calculados obtém-se a Figura 5-44, onde a diferença entre valores se torna mais marcante.



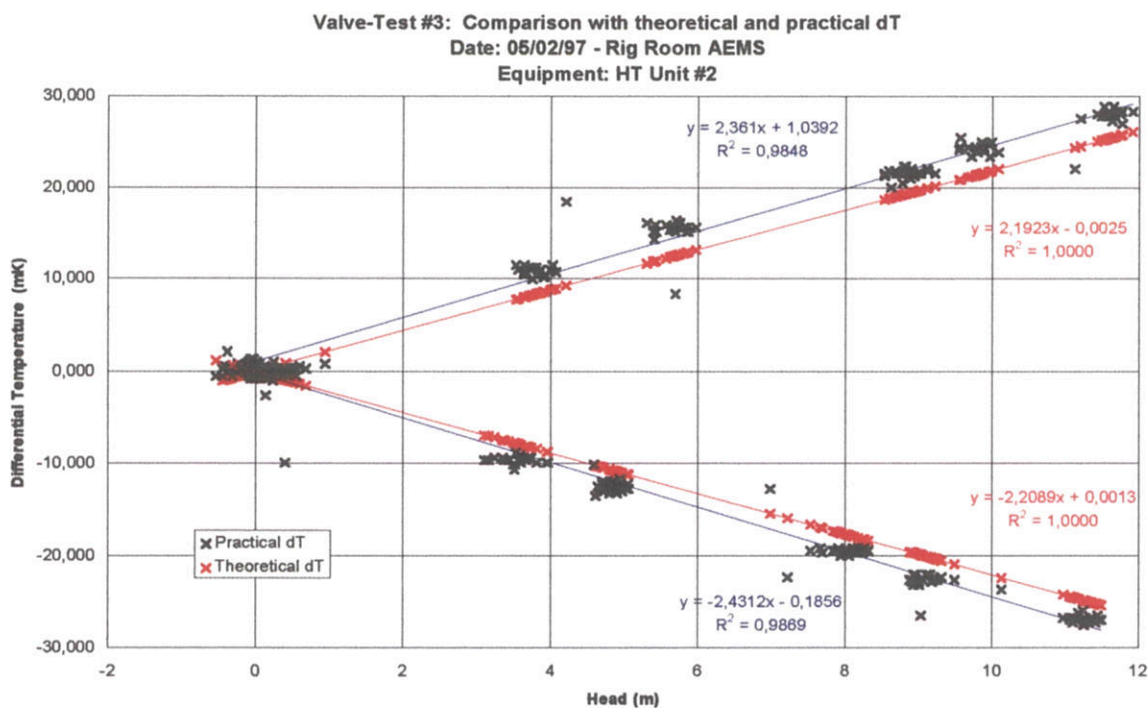
**Figura 5-44**

Esta variação ocorreu devido ao incorreto posicionamento dos sensores na canalização. Os sensores possuem sua parte sensível localizada à 60 mm de seu extremo. Durante a colocação dos instrumentos, por ter-se um diâmetro interno reduzido, uma parte sensível entrava em contato com a canalização e a medição de temperatura não era corretamente obtida. A Figura 5-45 ilustra o correto posicionamento do sensor junto à canalização.



**Figura 5-45**

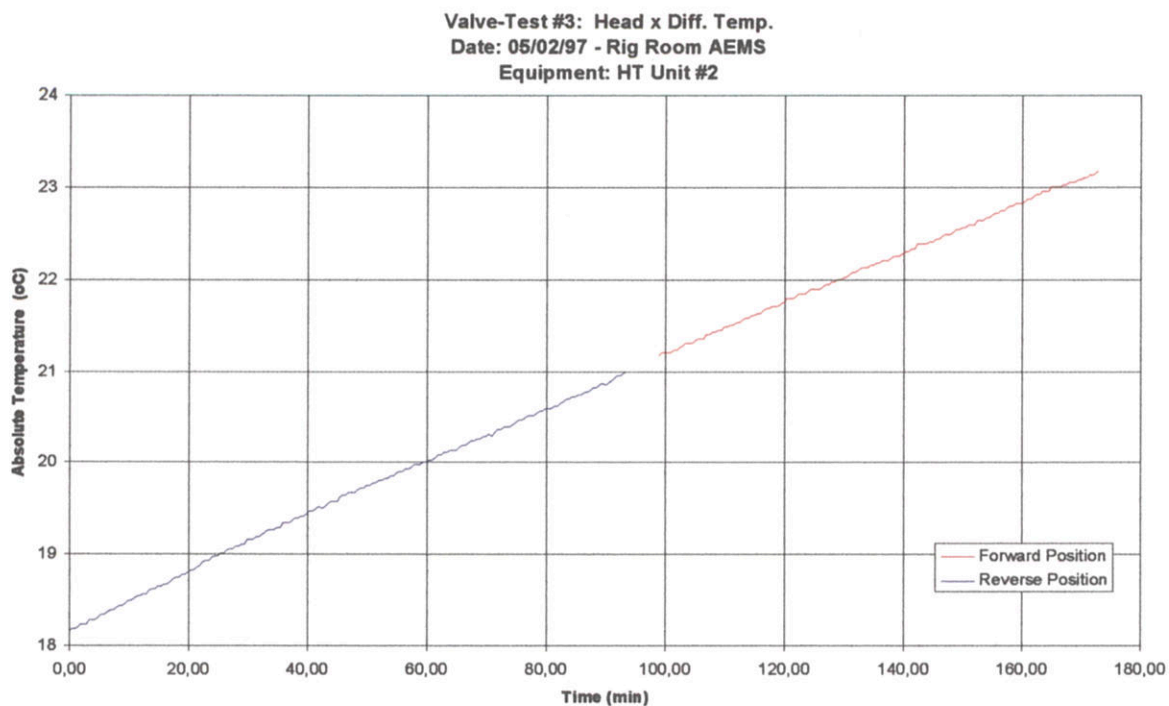
Utilizando o correto posicionamento, obteve-se o resultado exposto na Figura 5-46.



**Figura 5-46**

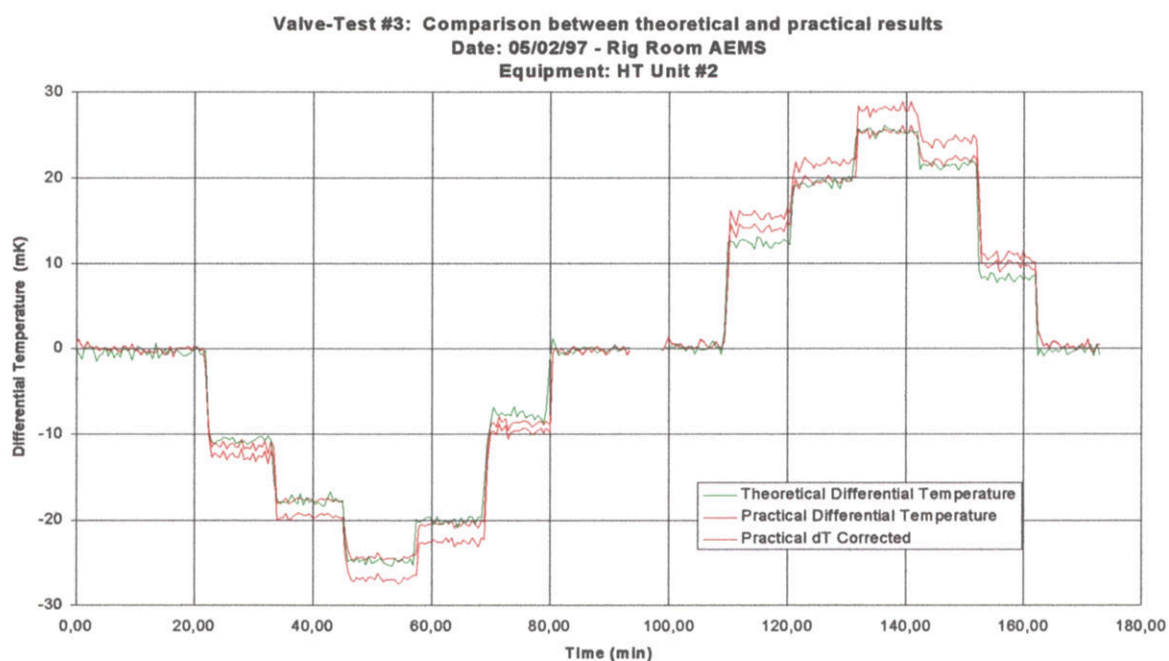
Neste gráfico, pode-se notar que o sistema de medição desvia-se do valor teórico em relação ao valor de sensibilidade, no qual utiliza o valor teórico de 0.26 mK/ DI. O valor de *Offset* do circuito permanece em -34mK durante todo o processo. Deve-se observar que os valores teóricos foram obtidos através da compensação da variação da temperatura, que aumentava durante todo o processo ( Figura 5-47).





**Figura 5-47**

Se for observada a variação da temperatura diferencial em relação ao tempo ( Figura 5-48), verifica-se que valor prático segue a resposta do valor teórico. Através de um cálculo determinou-se o valor de 0.235mK/DI que corrige a resposta adequando o valor final.



**Figura 5-48**

Pode-se observar que existe uma irregularidade na medição de temperatura entre os valores de 5 a 20 mK, decorrentes de uma possível diferença entre sensores. Entretanto, o erro causado não ultrapassa a 2 mK.

Este teste demonstrou a possibilidade do uso deste ensaio para a calibração prática do sistema de medição de temperatura diferencial. Entretanto, por haver uma constante modificação da temperatura diferencial, de aproximadamente 2 °C/hora, talvez um projeto especializado para esta aplicação necessite ser desenvolvido.

## 5.5 - Teste de funcionamento em baixa temperatura

Estes testes constituem na utilização de procedimentos padronizados utilizados pelo equipamento padrão *Yatesmeter* para ensaio de campo.

O procedimento possui as seguintes etapas:

1. **Instalação do equipamento:** Compreende na conexão dos sensores e transdutores dos equipamentos. Os equipamentos são ligados da forma ilustrada na Figura 5-49.

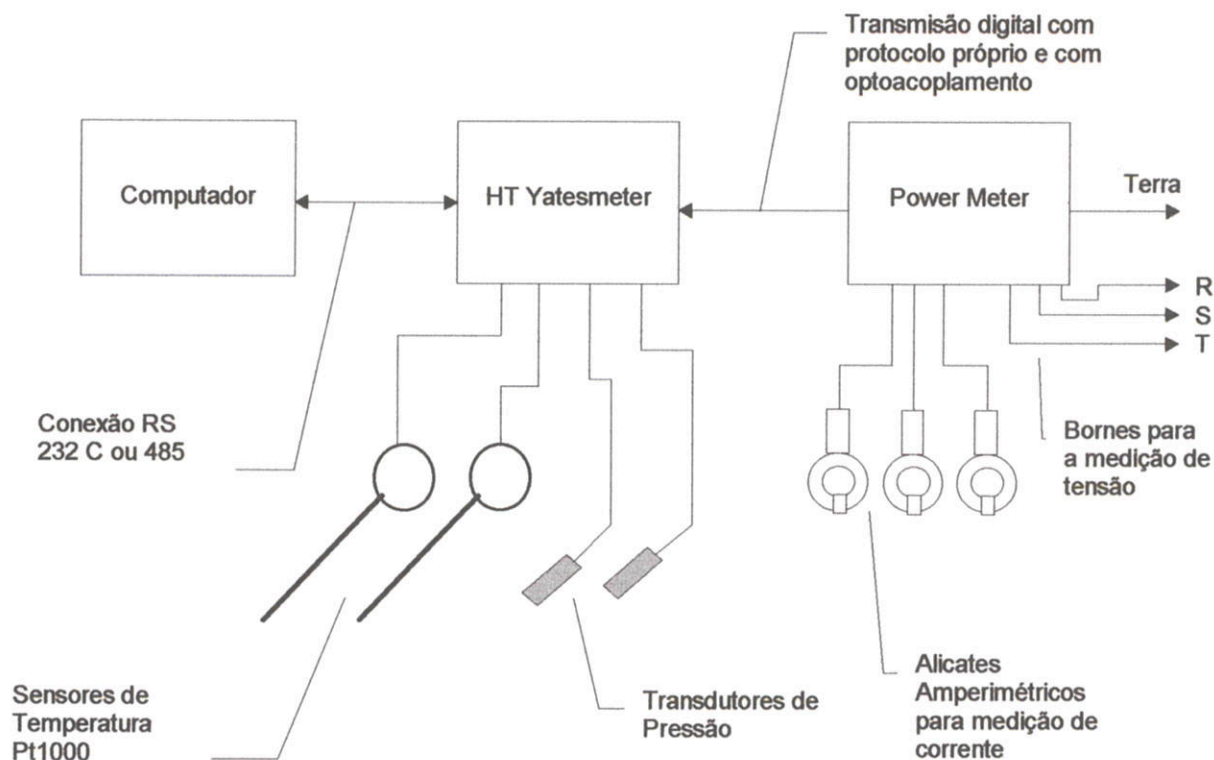
2. **Preparação inicial:** Consiste em colocar os instrumentos na posição adequada para a medição das variáveis. Devido a desvios relativos a pós-calibração, procedimentos de zeragem do equipamento são realizados. Para a medição de pressão, a zeragem é realizada através medição de pressão atmosférica local. Para a medição de temperatura, mede-se a temperatura na forma reversa, isto é, sensor de sucção colocado na saída da bomba e vice-versa por um determinado tempo. Posteriormente, inverte-se as posições e mede-se a temperatura pelo mesmo período de tempo. Determina-se a média dos valores diretos ( $V_{DIR}$ ) e reversos ( $V_{REV}$ ) e com a aplicação da equação:

$$V_{OFFSET} = \frac{V_{DIR} - V_{REV}}{2}$$

Obtém-se o valor de zeragem ( $V_{OFFSET}$ ) para a medição de temperatura. Este procedimento também auxilia na correção de 'drifts' que podem ocorrer nos sensores.

Convém observar que todos estes procedimentos são realizados com o uso do software *YM3B7*, fornecido pela empresa.

3. **Realização do teste de medição:** Com o sistema ( bomba e equipamento) em funcionamento e medindo todas as variáveis corretamente, pode-se iniciar o ensaio propriamente dito. O processo possui os seguintes passos:



**Figura 5-49**

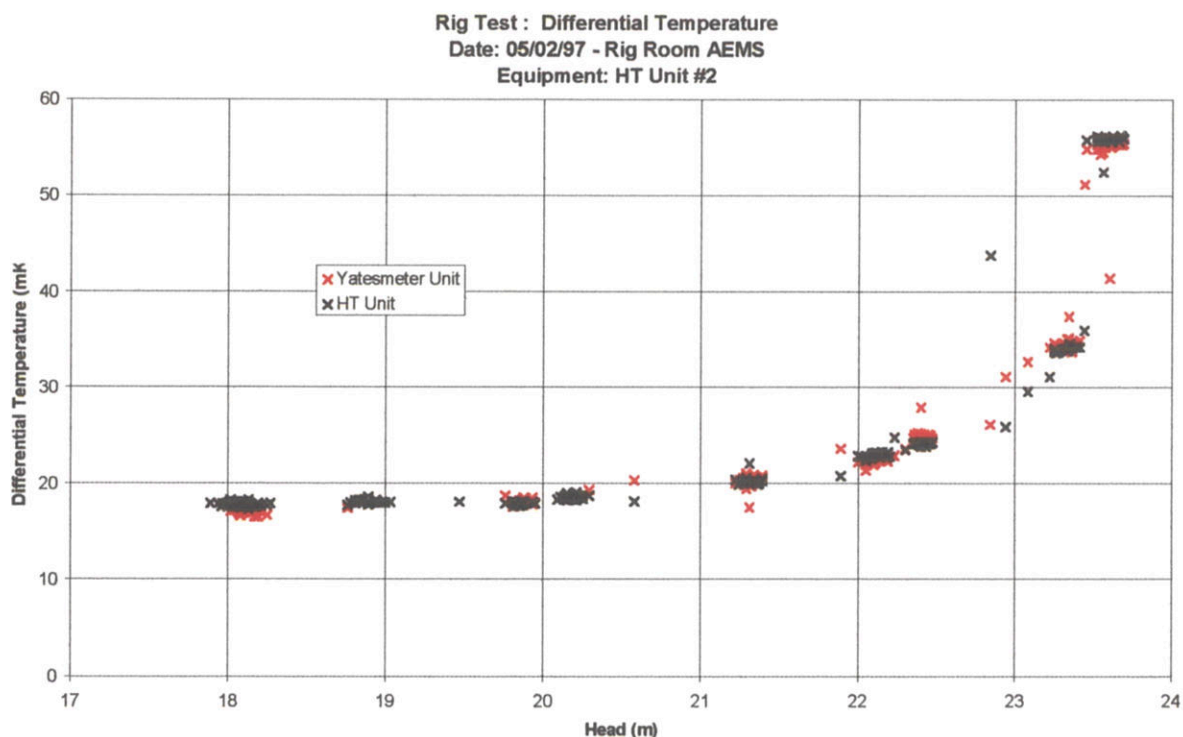
- a) Inicia-se o arquivamento do dados, definindo um arquivo e/ou impressora de saída;
- b) Define-se um ponto de abertura para a válvula e um fluxo padrão;
- c) Realiza-se a medição dos valores durante um tempo definido;
- d) Repete-se o passo b e c, em diferentes pontos de operação até obter todos os dados necessários para análise;

4. **Análise dos dados:** Utilizando os dados do experimento, plota-se os valores obtidos em oposição a valores de referência. A companhia possui um programa, denominado PumpGraphics, que foi desenvolvido exatamente para esta tarefa.

Dos testes realizados em baixa temperatura, é conveniente relatar um ensaio ocorrido no sistema da própria empresa. Neste, colocou-se a Unidade HT, com todos as variáveis de medição, e o equipamento *Yatesmeter* somente medindo temperatura e tentou-se comparar o desempenho dos dois sistemas.

O procedimento utilizado para este experimento consistiu, a partir da válvula principal totalmente aberta, obter 6 pontos enquanto estrangulava-se a válvula e 4 pontos enquanto abria-se novamente. Desta forma, conseguiu-se obter a resposta do sistema para duas formas de ensaio.

A melhor forma de comparar resultados referentes à temperatura diferencial é plotando-a contra valores de Pressão Manométrica (Head), pois possui-se maior relação entre estas variáveis. A Figura 5-50 mostra os valores resultantes deste experimento.



**Figura 5-50**

Neste gráfico, verifica-se que a resposta dos dois sistemas se equiparam para a determinação de temperatura diferencial.

Analisando o desempenho da Unidade HT como equipamento, este teste resultou na obtenção das seguintes curvas características da bomba, em função da vazão: Altura Manométrica ( Figura 5-51 ), Eficiência ( Figura 5-52) e Potência Consumida( Figura 5-53 ).



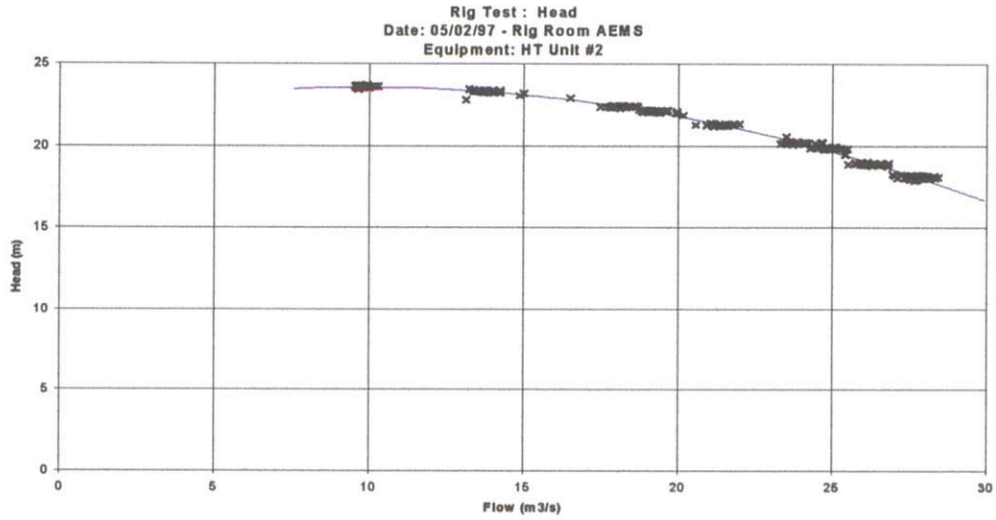


Figura 5-51

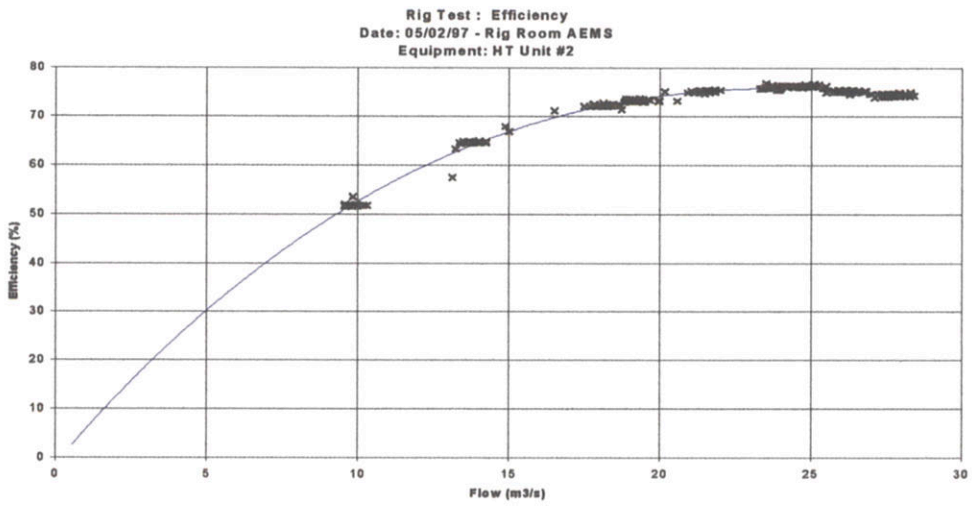


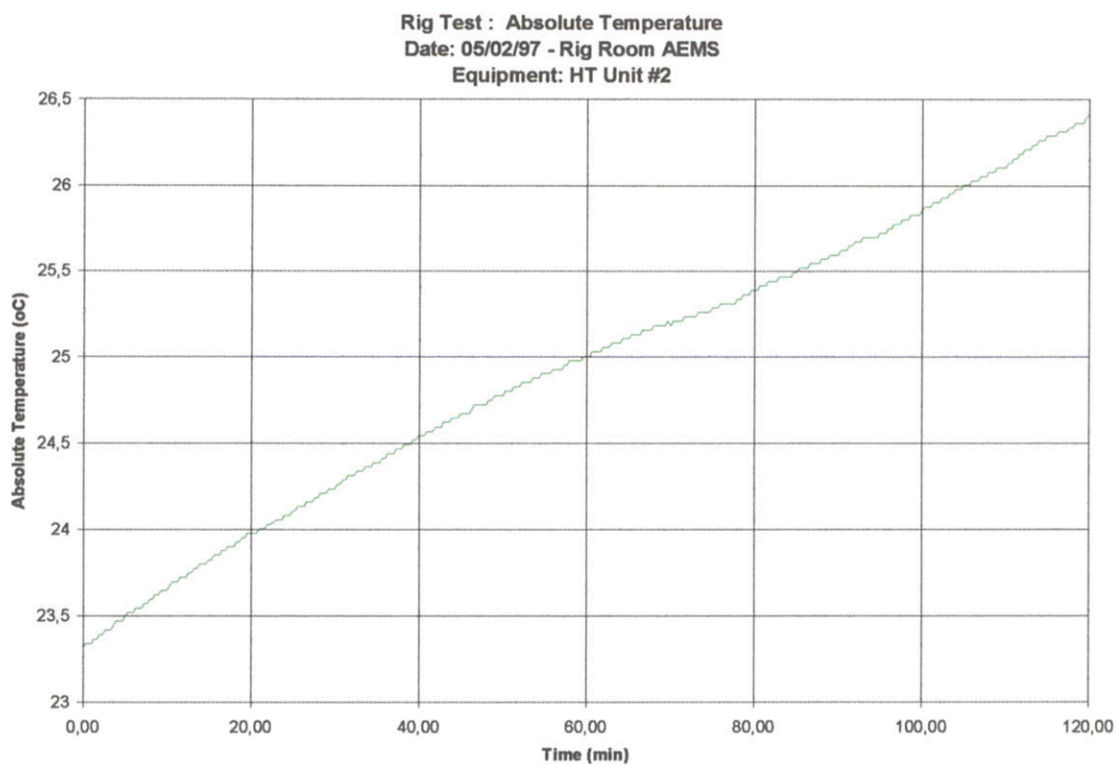
Figura 5-52



Figura 5-53

Estes resultados são importantes pois demonstram a possibilidade de utilização deste sistema para realização dos ensaios em bombas que trabalham com fluidos em baixa temperatura.

Deve-se destacar que a temperatura absoluta neste experimento aumentou constantemente, devido a energia aplicada pela bomba. A Figura 5-54 mostra a variação medida.



**Figura 5-54**

## 5.6 - Teste de funcionamento em alta temperatura ( 'on site' )

O último teste realizado foi a medição de eficiência de uma Bomba de Alimentação de Caldeira ( *Boiler Feed Pump* ). A bomba situava-se na Estação de Energia de Didcot, UK. A Figura 5-55 ilustra a Unidade 2, onde a bomba de alimentação está localizada.

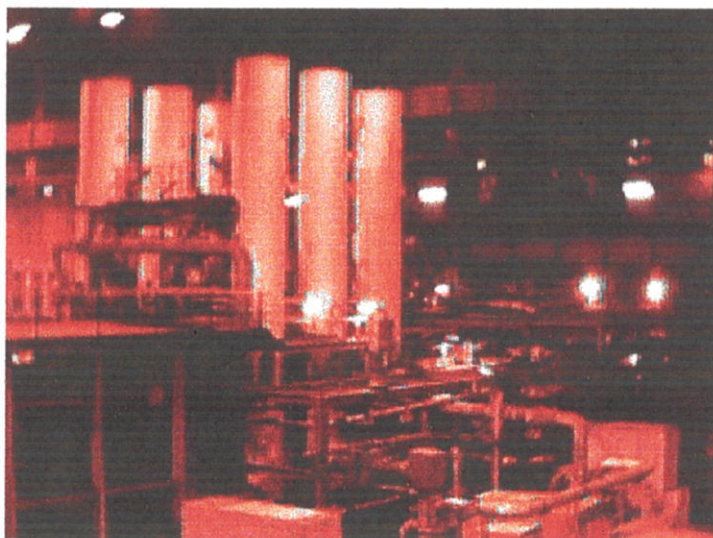


Figura 5-55

A bomba de alimentação fica localizada na parte posterior da unidade. A Figura 5-56 mostra a vista da Bomba de Alimentação e a Figura 5-57, o equipamento instalado em campo.

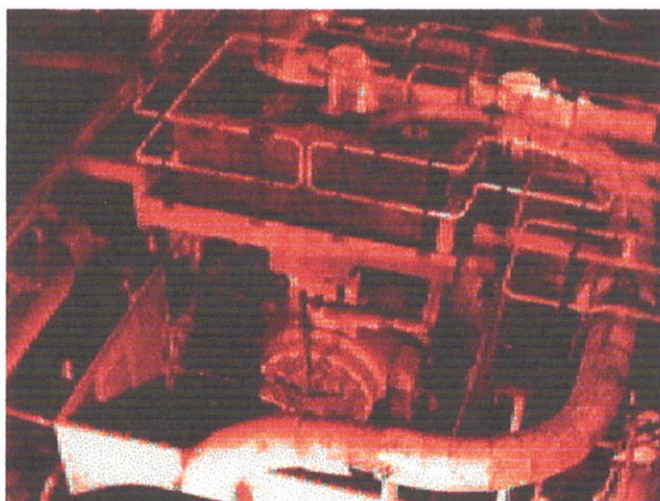
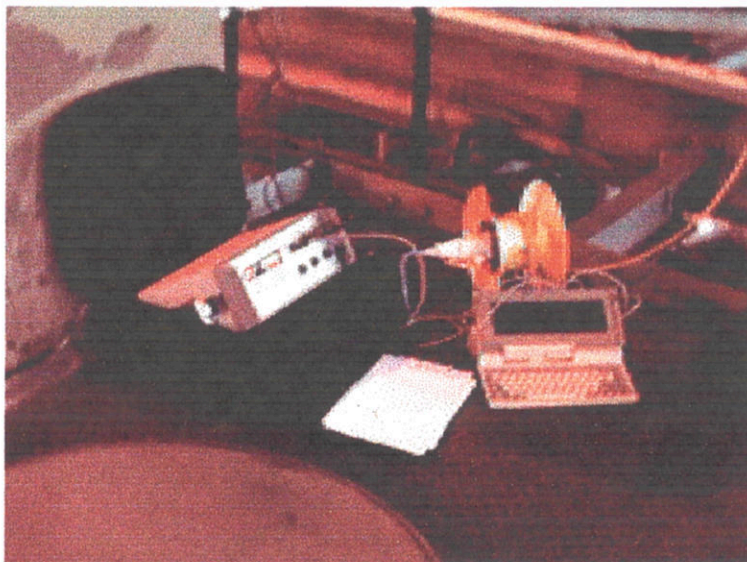


Figura 5-56



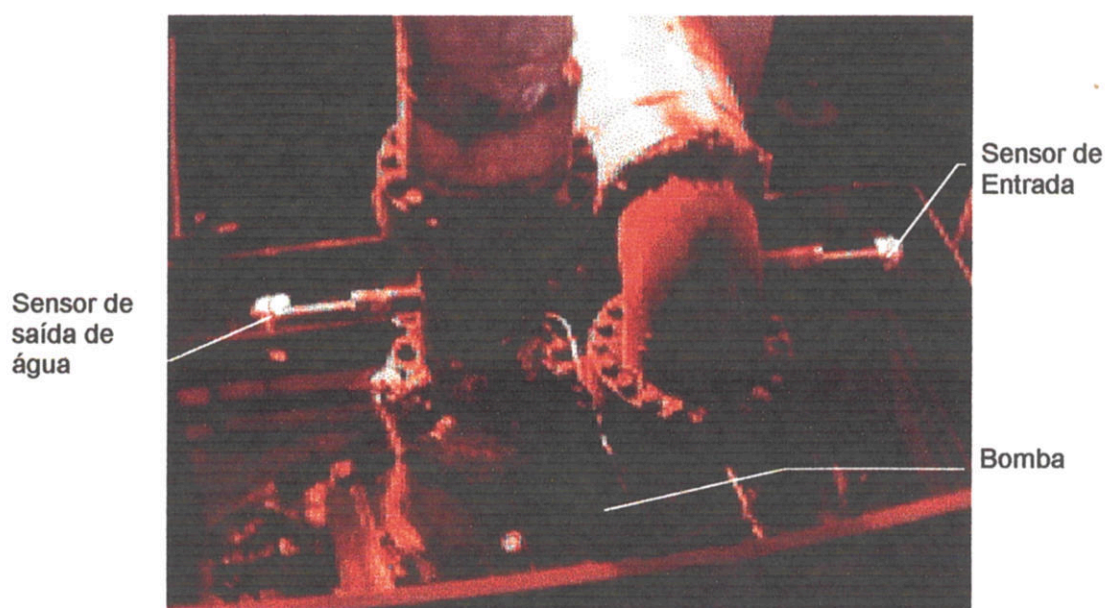
O teste consistiu somente na medição automática de temperatura, devido a normas de segurança para instalação de transdutores de pressão. Assim, a aquisição de pressão foi realizada manualmente.

Para ser possível instalar os sensores na canalização, foi necessário retirar os tubos



**Figura 5-57**

de proteção e utilizar os tubos de proteção instalados no próprio equipamento. A Figura 5-58 mostra a colocação deste sensores na bomba.



**Figura 5-58**



O boiler feed pump é composto por duas bombas:

- booster: responsável por elevar a pressão da água, que entra a uma temperatura de 150°C, para aproximadamente 200bar.
- Bomba de Alta pressão: responsável por mandar água para a caldeira.

A seqüência de ensaio foi realizada da seguinte maneira:

- 1) Instalação dos sensores para medição da temperatura no booster ( Figura 5-59 e Figura 5-60 );
- 2) Instalação dos sensores sobre a Bomba de alta pressão (Figura 5-61 e Figura 5-62);
- 3) Instalação dos sensores na entrada do booster e na saída da bomba de alta pressão ( Figura 5-63 e Figura 5-64);

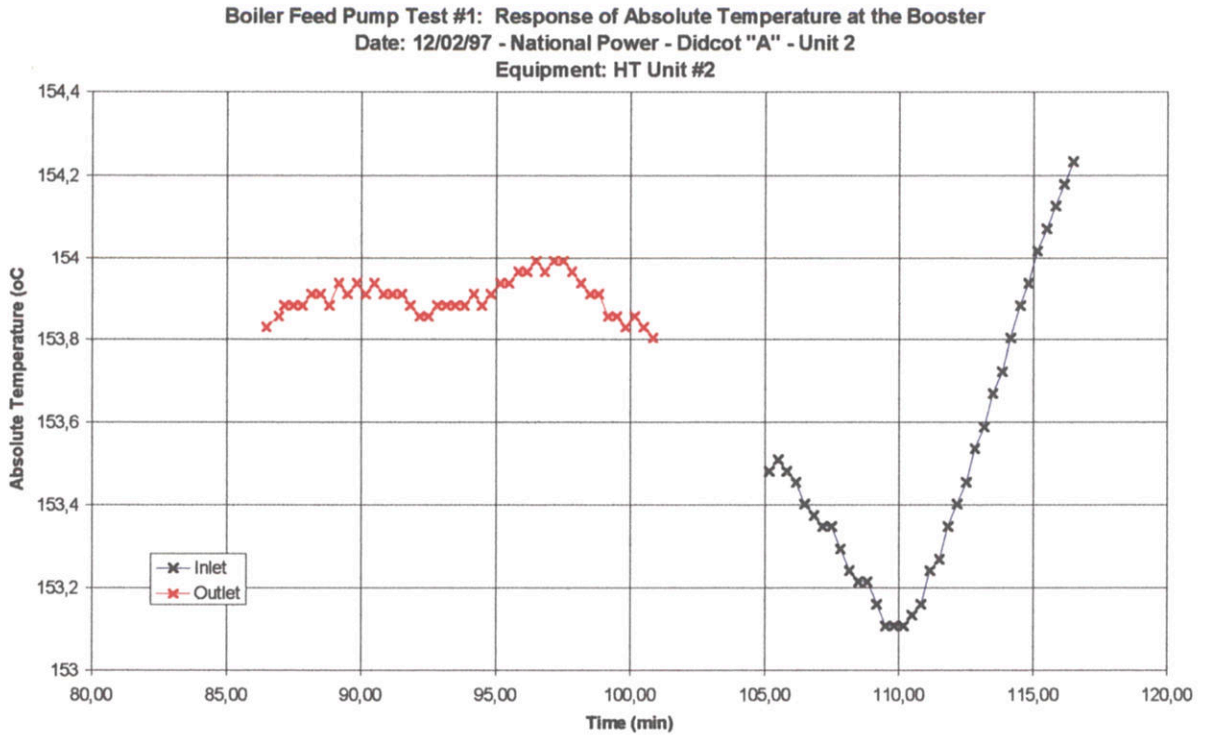


Figura 5-59

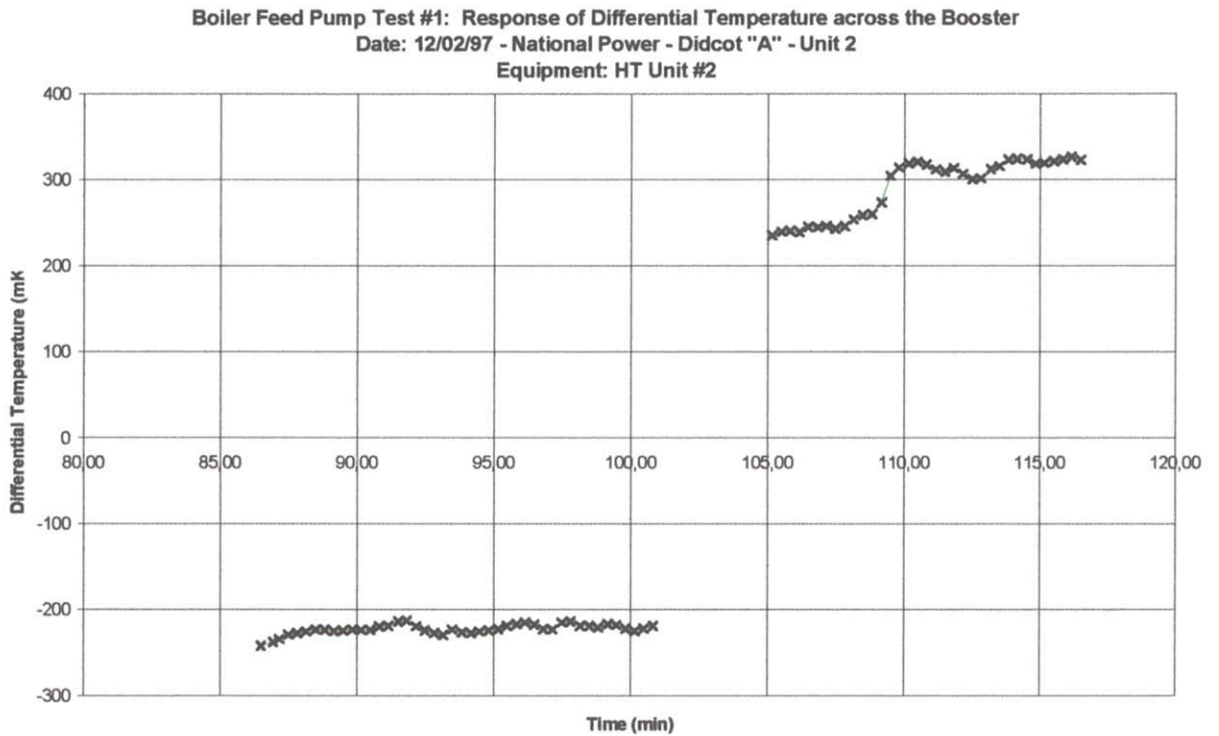


Figura 5-60

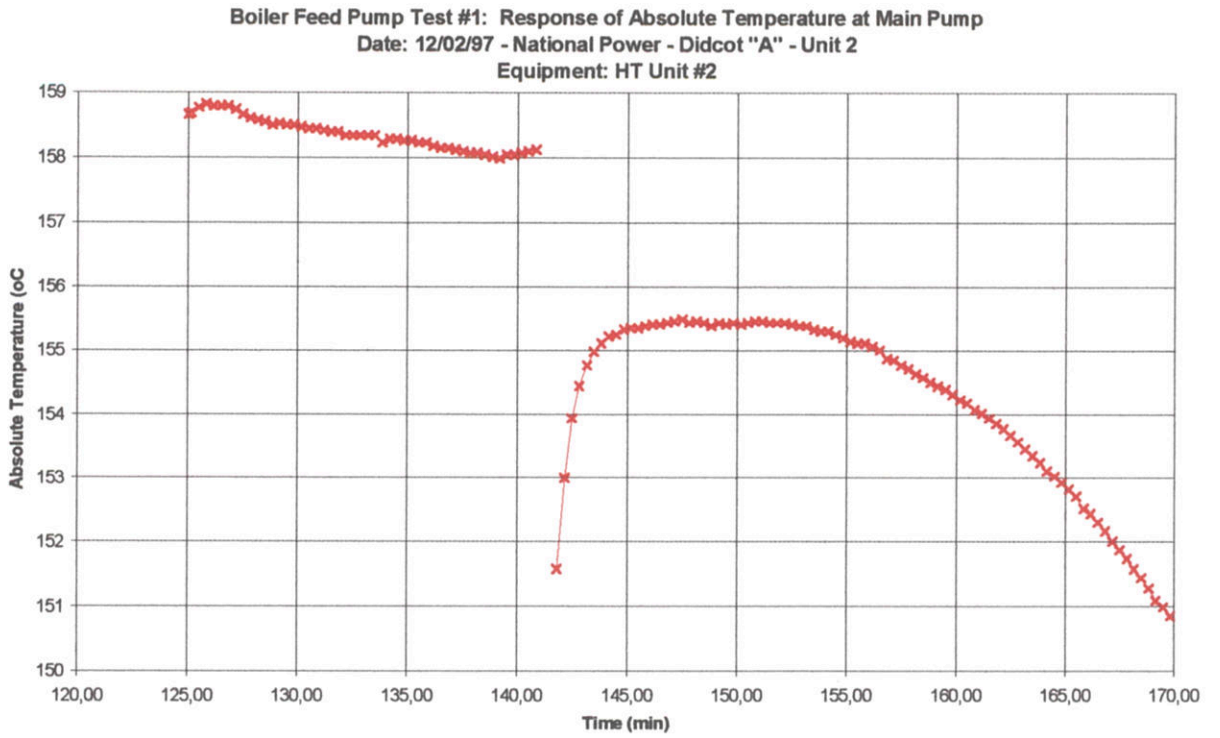


Figura 5-61

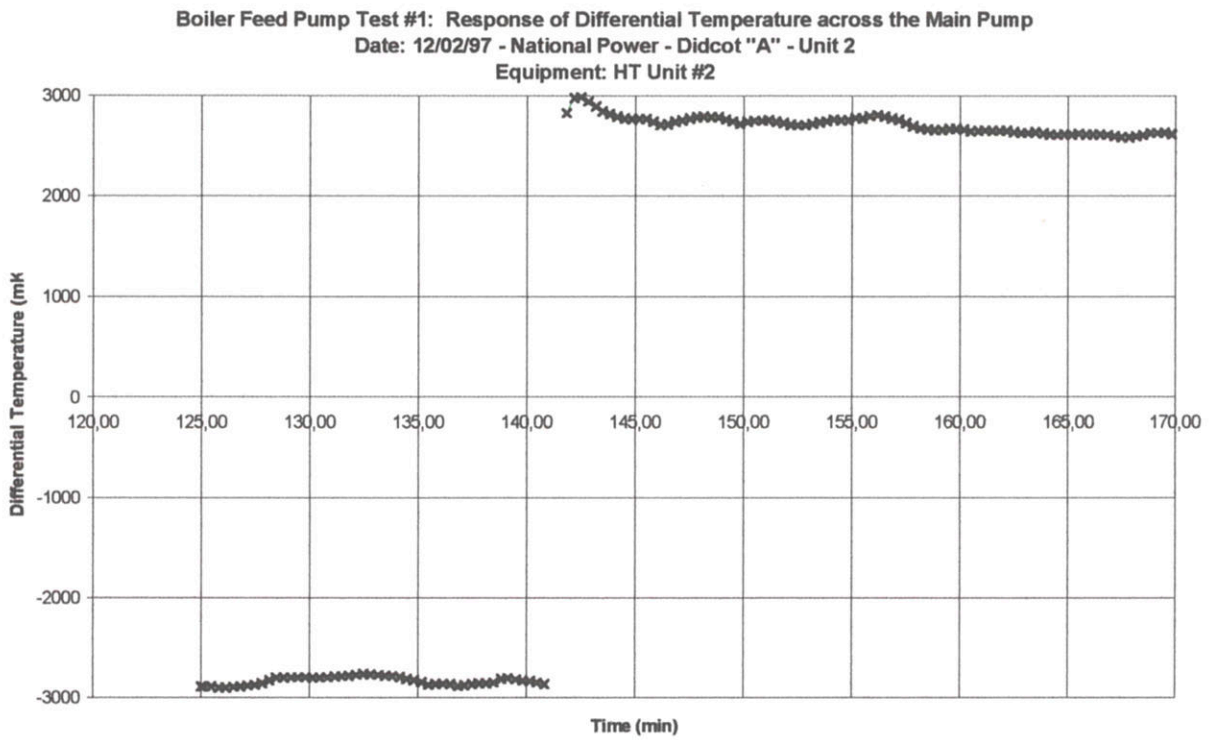


Figura 5-62

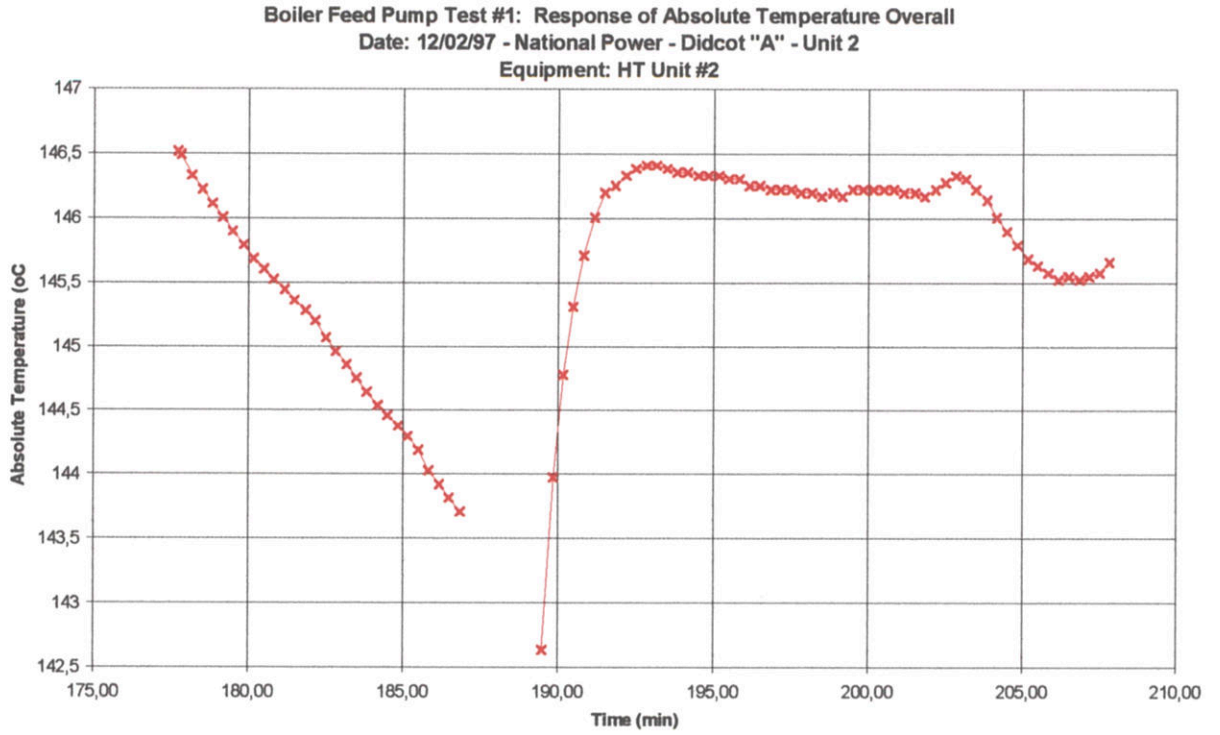


Figura 5-63

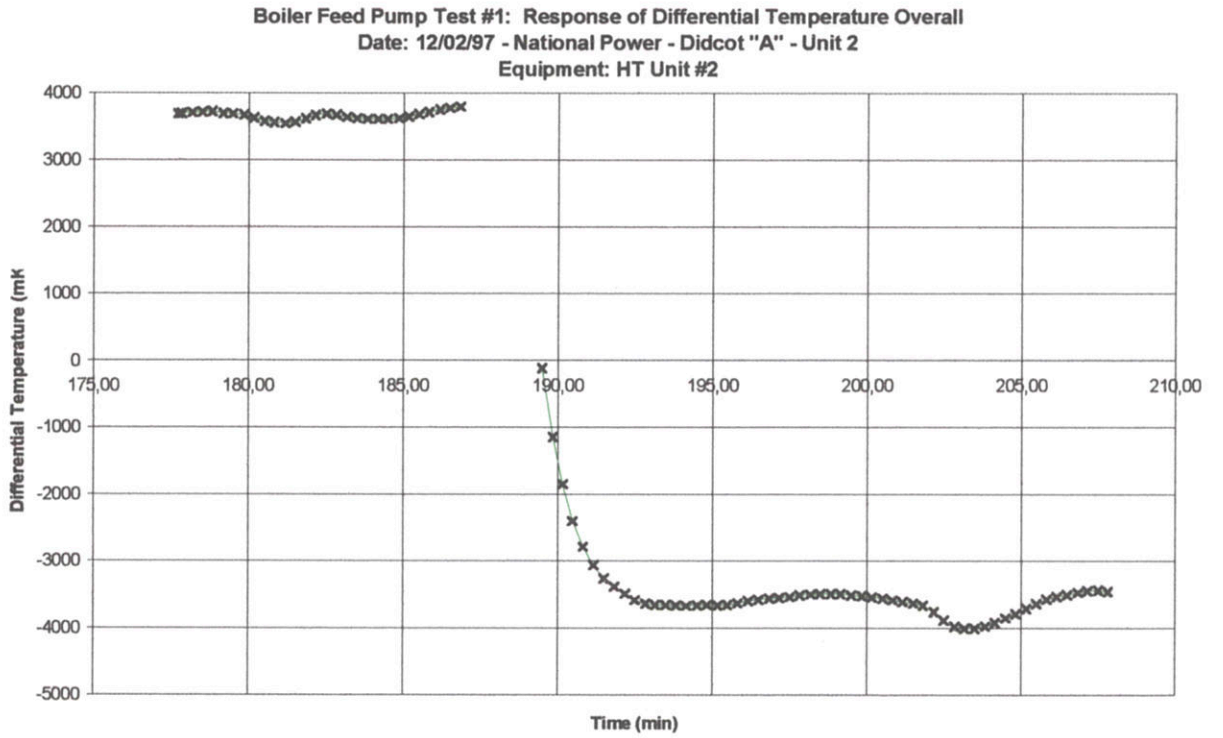


Figura 5-64



Sobre o ensaio pode-se concluir que:

1) *A temperatura do sistema não estava estabilizada:* Isto deve-se ao fato que o sistema tinha sido recém-ligado, uma vez que estava parado para manutenção.

2) *Indicação de temperaturas próximas ao esperado:* As temperaturas obtidas durante o ensaio variavam, dando a indicação de modificações no sistema. Entretanto, a magnitude do valor de temperatura estava próxima do esperado.

3) *Modificação no valor de offset:* Os valores de temperatura diferencial não apresentavam o valor de offset constante obtido em outros experimentos. A razão deste resultado não foi devidamente estudada, mas provavelmente deve-se ao fato do sensor não poder ser colocado no final do tubo de proteção existente no campo.

## **5.7 - Conclusão:**

Em sistemas de precisão, onde não se possui certeza nos resultados, uma grande quantidade de experimentos fazem-se necessários para comprovar o funcionamento do sistema. Os dados obtidos até o momento indicaram que o sistema possui um bom grau de confiabilidade, uma vez que de todos os experimentos realizados mostraram resultados parecidos com os valores esperados.

Para baixa temperatura, os resultados demonstraram que o circuito está funcionando tão bem quanto o equipamento normal e, além disso, tem algumas características de estabilidade melhores que o sistema Yatesmeter.

Analisando os testes realizados em alta temperatura, não se pode dizer que o sistema esta plenamente funcionando, pois não foram realizados testes na bomba sob condições estáveis. Entretanto, pode-se dizer que o sistema está respondendo às variações de temperatura da bomba de alimentação da caldeira e demonstra um promissor resultado.

O principal problema deste sistema está na calibração dos sensores, de forma a obter o grau de exatidão requeridos por norma (0.1°C). Os ensaios realizados apenas demonstraram a funcionalidade do sistema e a indicação de correto funcionamento, embora ainda não metrologicamente confiável.

O ensaio com o calorímetro de estrangulamento demonstrou um experimento de precisão sem igual para calibração de temperatura diferencial. Entretanto, a técnica necessita ser melhorada, devido ao aumento constante da temperatura.

## 6. Conclusões e perspectivas futuras:

Sobre o trabalho pode-se ter as seguintes conclusões:

- O desenvolvimento deste projeto permitirá que a companhia Advanced Energy Monitoring System Ltd. possa atuar em um novo mercado não antes explorado. Este novo mercado, compreendido por grandes empresas da área de energia, possui um retorno altamente lucrativo, no qual não existe produto concorrente no mesmo nível.
- As características encontradas neste equipamento superaram as expectativas de uso, uma vez que pode medir rendimento de bombas em baixa temperatura, com a mesma precisão obtida nos equipamentos da empresa. Possivelmente, no momento que tiver sido razoavelmente testado, pode-se substituir os sensores existentes no equipamento pelos sensores baseados em RTD.
- Existia um tipo de serviço, denominado *Fix Yatesmeter*, no qual o equipamento ficava ligado constantemente ao sistema, determinado a eficiência do sistema ON-LINE . Os sensores atuais tem o problema de ter um desvio de seu funcionamento correto quando ligados por longo espaço de tempo e, por consequência, esta linha de equipamentos necessitou ser desativada. Com as características de estabilidade encontradas na unidade HT, abre-se um novo precedente junto a empresa, onde pode-se novamente reativar esta linha de negócios.
- Por ter sido uma adaptação ao equipamento, já existente, não foi necessário utilizar serviços externos para a confecção de placas. Além disso, uma vez fixado na placa analógica, esta pode ter o mesmo tratamento recebido pela placa normal, não sendo necessário modificar o processo de fabricação do equipamento.

Com relação a trabalhos futuros pode-se propor que:

- O circuito não teve ensaios suficientes em campo, para obter o grau de confiabilidade necessário e determinar a repetitibilidade e estabilidade do sistema.
- Deve-se realizar mais estudos a respeito da forma de calibração do equipamento. Sabe-se que para obter a calibração do sistema, necessita-se obter um bom sistema de calibração, com incerteza menor que 0.01°C. E somente alguns laboratório são certificados para este serviço.

- Deve-se realizar um trabalho teórico mais acurado para levantamento das características e propriedades do sistema. Também deve-se analisar qual é a melhor técnica para medição de temperatura.

## 7. Bibliografia:

1) [WERBER 91]

WEBER D., NAU M. *Electrical Temperature Measurement with Thermocouple and Resistance Thermometer*, Ed. Jumo; 1991

2) [HOROWITZ 91]

HOROWITZ, Paul and HILL, Winfield. *The Art of Electronics*; 2nd Edition; University Express ; Cambridge; 1991.

3) [WILLIAMS 95]

WILLIAMS, Tim. *EMC for Product Design*; Butterworth-Heinemann; 1995.

4) [FLESCH 95]

FLESCH, C.A. *Medição de Grandezas Mecânica*; UFSC; Florianópolis; 1994.

5) [THE PUMP CENTRE 95]

The Pump Centre. *Code of Practice for Pump Efficiency Testing by the Direct Thermodynamic Method*; Jun 95; Report 695/27.

6) [YATES 81]

YATES, M. *Pumps - The Developing Needs*; 7th Technical Conference of the British Pump Manufacturers' Association; 1981.

7) [LEINONEN 86]

LEINONEN, K.. *International Conference on Condition Monitoring*. Brighton; England; 21-23 May 1986.

8) [OMEGA 95]

OMEGA Engineering. *The Temperature Handbook*; Vol.29; 1995.

9) [MACINTYRE 87]

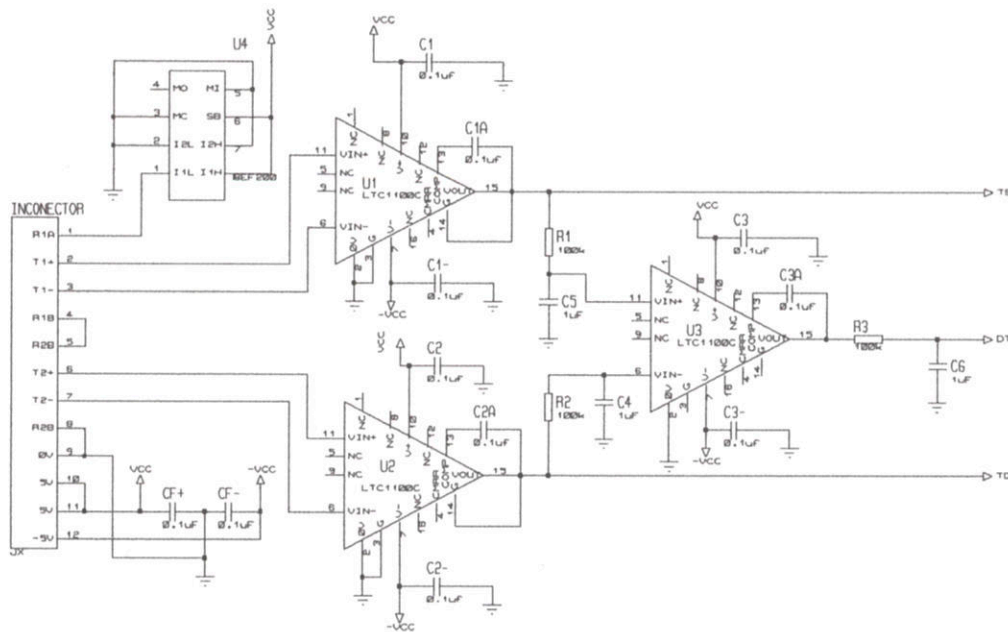
MACINTYRE, Archibald Joseph. *Bombas e Instalações de Bombeamento*; 2ª Edição; Ed. Guanabara; 1987; RJ.

10) [YATES e WILLEY 91]

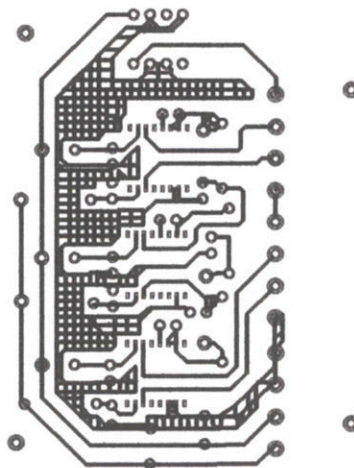
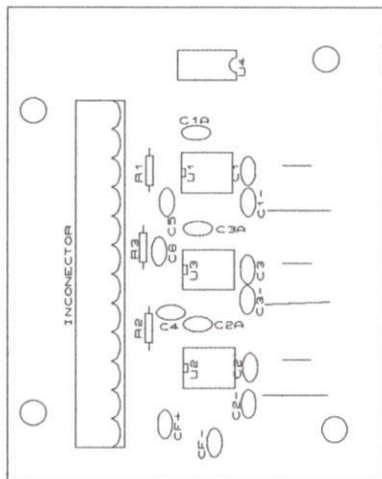
YATES, M. e WILLEY, A. *Energy saving in pumping in the U.K. Water Industry*. 1991.



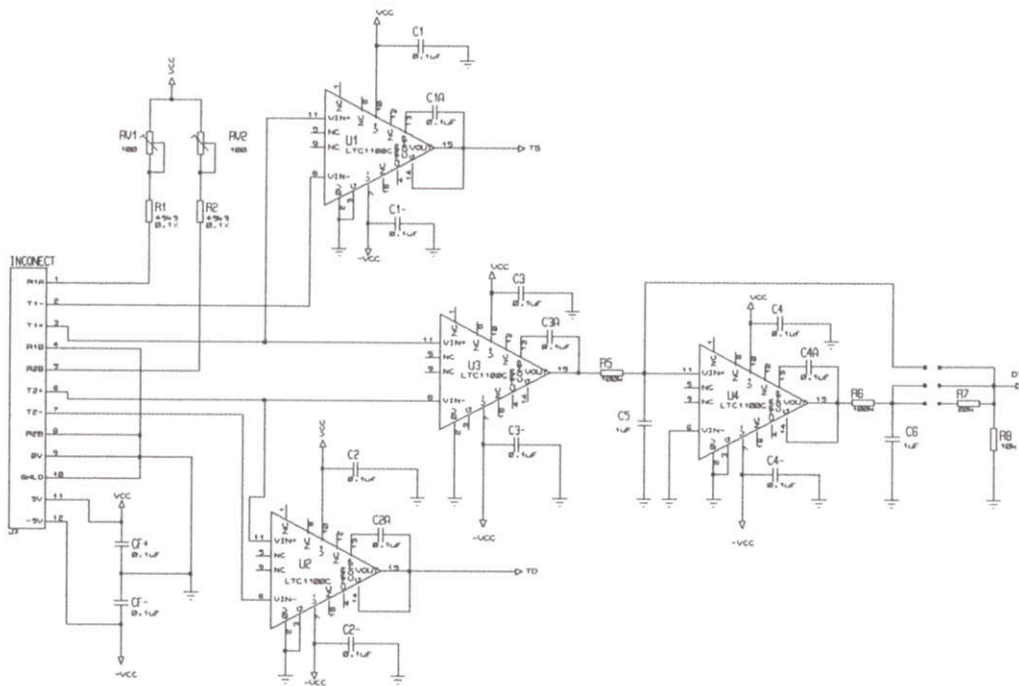
# ANEXO I: Diagrama Esquemático Fonte de Corrente



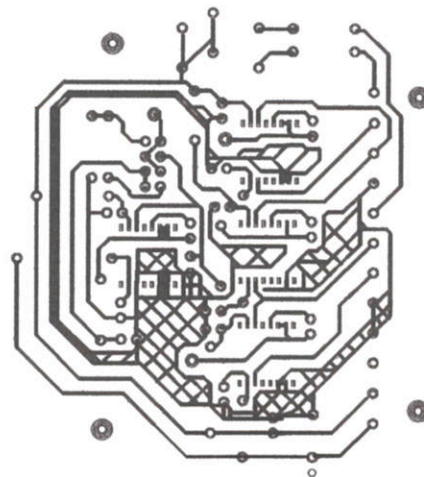
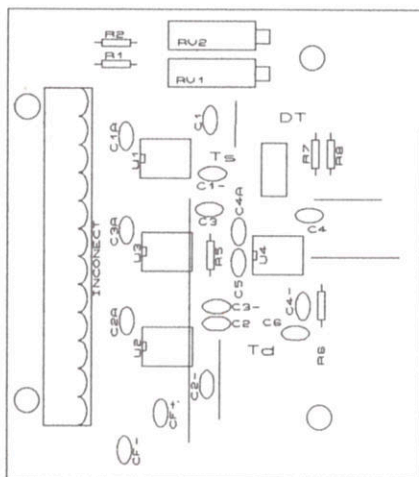
**Layout :**



# ANEXO II: Diagrama Esquemático: Ponte de Wheatstone



## Layout :



## ANEXO III: Valores de correção para Alta Temperatura

Table used to analyse the results from calibration

Calibration#6 - 18/12/96

<i>DW=Red</i>		<i>Linear Interpolation</i>			<i>Quadratic Interpolation</i>		
<i>Temp.</i> oC	<i>TW</i> <i>Dig. Incr.</i>	<i>Output</i> oC	<i>Abs. Error</i> oC	<i>Rel. Error</i> %	<i>Output</i> oC	<i>Abs. Error</i> oC	<i>Rel. Error</i> %
80,00	13128	79,649	0,351	0,44	80,016	-0,016	-0,02
88,30	13442	88,044	0,256	0,29	88,250	0,050	0,06
98,14	13818	98,071	0,069	0,07	98,117	0,023	0,02
107,88	14192	108,050	-0,170	-0,16	107,971	-0,091	-0,08
118,78	14602	118,977	-0,197	-0,17	118,798	-0,018	-0,02
128,21	14955	128,393	-0,183	-0,14	128,162	0,048	0,04
137,55	15308	137,809	-0,259	-0,19	137,557	-0,007	0,00
146,91	15658	147,143	-0,233	-0,16	146,899	0,011	0,01
165,07	16335	165,207	-0,137	-0,08	165,063	0,007	0,00
184,34	17049	184,258	0,082	0,04	184,340	0,000	0,00
203,54	17756	203,118	0,422	0,21	203,546	-0,006	0,00

Z= -2,7054E+02

G= 2,6675E-02

kA= 1,214528E-07

kB= 2,293752E-02

kC= -2,420314E+02

<i>TW=Blue</i>		<i>Linear Interpolation</i>			<i>Quadratic Interpolation</i>		
<i>Temp.</i> oC	<i>DW</i> -	<i>Output</i> oC	<i>Abs. Error</i> oC	<i>Rel. Error</i> %	<i>Output</i> oC	<i>Abs. Error</i> oC	<i>Rel. Error</i> %
78,48	13082	78,279	0,201	0,26	78,508	-0,028	-0,04
83,38	13270	83,302	0,078	0,09	83,467	-0,087	-0,10
97,94	13814	97,833	0,107	0,11	97,843	0,097	0,10
107,75	14185	107,752	-0,002	0,00	107,683	0,067	0,06
118,18	14578	118,253	-0,073	-0,06	118,125	0,055	0,05
128,21	14954	128,291	-0,081	-0,06	128,128	0,082	0,06
137,55	15309	137,784	-0,234	-0,17	137,609	-0,059	-0,04
146,91	15659	147,144	-0,234	-0,16	146,977	-0,067	-0,05
165,07	16335	165,205	-0,135	-0,08	165,108	-0,038	-0,02
184,34	17051	184,330	0,010	0,01	184,386	-0,046	-0,02
203,54	17756	203,178	0,362	0,18	203,464	0,076	0,04

Z= -271,2865859

G= 0,0267211

kA= 7,900915E-08

kB= 2,429658E-02

kC= -2,528614E+02

for Linear Interpolation:

$$\text{Output(oC)} = \text{DW} \cdot \text{G} + \text{Z}$$

$$\text{Error(oC)} = \text{Output} - \text{Temp}$$

$$\text{Error(\%)} = ((\text{Output} - \text{Temp}) / \text{Temp}) \cdot 100$$

Equations for Quadratic Interpolation:

$$\text{Output(oC)} = (\text{kA} \cdot \text{DW}^2) + (\text{kB} \cdot \text{DW}) + \text{kC}$$

$$\text{Abs. Error(oC)} = \text{Output} - \text{Temp}$$

$$\text{Rel. Error(\%)} = ((\text{Output} - \text{Temp}) / \text{Temp}) \cdot 100$$

- 1) TW, DW and dT values in this table was used to make Chart1 and Chart2
- 2) Coefficients come from Equation on Chart1( TW ) and Chart2 ( DW )
- 3) To convert the coefficients for Program Standard, see instruction





## ANEXO V: Projeto e Implementação de Placa de Circuito Impresso

### ***Projeto de placa de circuito impresso***

Para a realização do circuito impresso dos circuitos projetados foi utilizado o software PROTEUS da Labcenter Electronics.

O Software é composto por três módulos básicos:

- ISIS - Sistema de geração de diagramas esquemáticos
- ARES - Sistema de geração de circuito impresso
- LISA - Sistema para simulação de diagramas eletrônicos

O processo para geração de um projeto eletrônico através deste sistema tem a seguinte seqüência:

1. Desenvolver o diagrama eletrônico do circuito com o auxílio do ISIS;
2. Verificar se o circuito corretamente ligado através Electrical Rules Check
3. Utilizar o LISA para verificar a funcionalidade do sistema por simulação. Em caso de qualquer modificação, deve-se voltar a etapa 1;
4. Gerar um arquivo que relaciona as informações de conexão entre componentes (NetList) para a criação do layout no ARES;
5. Gerar o arquivo de lista de componentes ( Bill of Material ) para especificação e compra;
6. Inicializar o ARES, chamando o arquivo *NETLIST*. O sistema irá automaticamente obter os componentes necessários na biblioteca.
7. Posicionar os componentes na superfície da placa, de forma organizada e adequada;
8. Utilizar o auto-roteador para obtenção das ligações entre componentes. Se nem todas as ligações entre os componentes forem realizadas, é necessário determinar o caminho de ligação entre os componentes manualmente;
9. Arquivar e imprimir os dados resultantes;

Para o desenvolvimento do circuito, não foi realizada a simulação pelo fato de não haver o pacote LISA disponível. Também não foi utilizado o auto-roteamento porque o sistema somente executa o roteamento utilizando dupla face da placa e o processo de fabricação exigia simples face. Desta forma, toda o processo de ligação entre componentes foi realizado manualmente.

Deve-se destacar que, por não haver disponível nas bibliotecas do software alguns dos componentes existentes no projeto final, foi necessário a inclusão deste componente, criando o seu diagrama esquemático e vinculando-os ao construtor de layout.

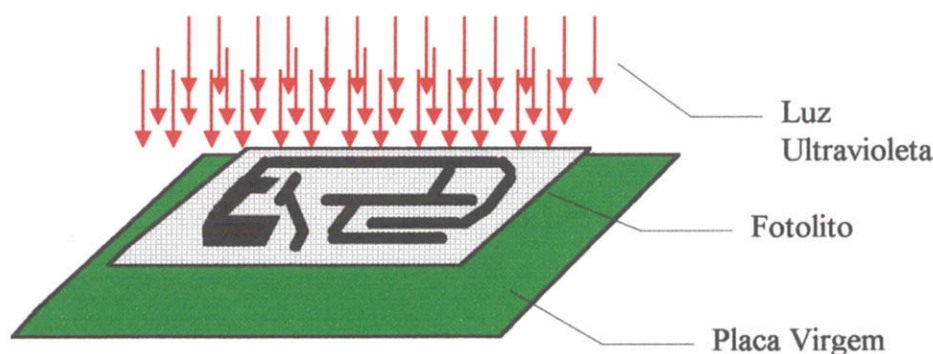
### ***Construção e montagem de placas de circuito impresso***

Uma vez definido o circuito impresso, o próximo passo é a construção da placa de circuito impresso e montagem dos componentes.

Para a fabricação do circuito impresso utiliza-se o seguinte procedimento:

**1.Realização do Fitolito:** O fitolito é uma folha translúcida com a impressão do layout. A impressão é, geralmente, realizada através de um plotter com uma pena de grande resolução ( 0.1mm ) para melhorar a qualidade final.

**2.Transferência da imagem à placa:** O processo consiste em expor certas partes de uma placa virgem à luz ultravioleta. A placa virgem é composta por uma placa de fenolite ( para dar resistência mecânica), uma camada de cobre ( para realizar as ligações elétricas), uma camada de elemento fotoresistivo ( para transferencia da layout a placa) e uma fita de proteção da camada resistiva. As áreas são definidas pelo fitolito, que é utilizado como máscara no processo. O processo de exposição da placa à ultravioleta dura exatamente 2



**Figura 7-65**

minutos e qualquer tempo extra pode levar a imperfeição da impressão. A Figura 7-65 ilustra o posicionamento das partes no processo.

**3.Retirada do material sensibilizado:** Após o processo de exposição à luz ultravioleta, haverá na placa partes do filme sensibilizadas que devem ser retiradas. Isto é realizado através de um banho em uma solução chamada *Revelador*. O tempo de exposição não é determinado e depende do tempo da data de uso do *Revelador*. Terminado o processo, a placa deve ser limpa com água corrente.

**4.Remoção da camada de cobre:** O filme não sensibilizado, agora com a imagem transposta do fotolito, possui a característica de evitar a corrosão a percloro de ferro. Assim, a placa é colocada em um banho deste material, que reage e retira a camada de cobre sem proteção. Quando todo o material foi retirado, a placa é limpa com água corrente novamente e secada. Utilizando um material de abrasão, a camada de material resistivo é retirada e o cobre é posteriormente limpo com uma solução desoxidante.

**5.Revestimento da camada de cobre :** Para evitar posterior oxidação do cobre e permitir melhores condições na soldagem, a placa é mergulhada em uma solução, onde material metálico se deposita sobre a superfície de cobre da placa.

**6.Realização dos furos:** O último passo para a realização da placa é o realização de furos para fixação dos componentes. Esta atividade é realizada com uma furadeira de pequenas dimensões, especial para esta atividade.

Uma vez terminada a confecção da placa de circuito impresso, o próximo passo foi a soldagem dos componentes sobre a placa. Deve-se apenas expor que a colocação de componentes de montagem de superfície com equipamentos comuns é possível, entretanto exige grande cuidado na colocação dos componentes, devendo-se evitar o uso de Pistola de Aquecimento.