

SISTEMA PARA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO TERMODINÂMICO EM AMBIENTES CONTROLADOS

Luís Mauro Moura

Nathan Mendes

Kátia Cordeiro Mendonça

André Luiz P. Possobom

Augusto Erzinger Jr.

Luís Fernando Oresten

Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Laboratório de Sistemas Térmicos, Rua Imaculada Conceição, 1155, 80215-901, Curitiba/PR, Brasil. E-mail: lmoura@ccet.pucpr.br

Resumo

Este trabalho descreve um sistema de aquisição, baseado em plataforma VXIbus, destinado à medição de grandezas inerentes a sistemas de refrigeração para avaliação de desempenho termodinâmico em ambiente controlado. O elemento principal deste sistema consiste em uma câmara climatizada onde temperatura e umidade relativa podem ser ajustados, entre valores de -10 a 60°C e 10 a 90% , respectivamente. O sistema prevê o emprego de sensores – sendo oitenta para sinais de temperatura (termopares tipo T) e outros 30 canais para outras grandezas.

Palavras-chave: Consumo de energia, Câmara climatizada, Instrumentação virtual, Sistemas térmicos.

1. INTRODUÇÃO

O principal equipamento do Laboratório de Sistemas Térmicos constitui-se de uma Câmara Climatizada de Testes de Sistemas Térmicos, equipamento destinado a simular ambientes diversos em seu interior, com temperatura e umidade relativa controlada. Consiste num compartimento de $2,5\text{m} \times 3,5\text{m} \times 3,0\text{m}$, cujo fornecimento de ar nas condições desejadas é conseguido por meio de um sistema de ar condicionado composto de duas unidades condensadoras externas à Câmara, com capacidade total de $8,7\text{ kW}$ ($\sim 29,8\text{ kBTU/h}$), que opera na faixa de -10°C a 60°C . O ar é conduzido por meio de dutos aos *dampers*, que possuem regulagem de inclinação de acordo com o fluxo necessário e que são controlados por CLP (Controlador Lógico Programável). Estes insuflam o ar pelo teto, sendo o retorno pelo piso. Como último estágio, existem duas resistências, que aquecem o ar de insuflamento se necessário.

Nesse ponto se encaixa o propósito deste trabalho, o qual inicia por uma criteriosa análise do sistema de medição e calibração dos componentes. Em seguida, apresenta-se a análise da junta de referência com relação à variação de temperatura e seu comportamento em regime transiente. Descreve-se também a determinação do gradiente de temperatura vertical da Câmara Climatizada, atividade necessária para a execução de ensaios em sistemas de refrigeração de acordo com a norma *ISO 8561* (1998).

2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DA CÂMARA CLIMATIZADA

A função básica da Câmara Climatizada (doravante designada como CC) é a avaliação do comportamento de sistemas, sejam mecânicos ou elétricos, quando submetidos às condições determinadas do ambiente interno da câmara. Essa avaliação é feita, basicamente, através do monitoramento das temperaturas do sistema ou ao redor dele. O melhor exemplo que descreve esta função é o teste de sistemas de refrigeração. No produto, são monitoradas as temperaturas do sistema onde circula o gás refrigerante (evaporador, condensador, dispositivo de expansão e compressor), assim como as pressões do sistema e as temperaturas do ambiente refrigerado. O sistema de aquisição de dados realiza medições de 80 pontos de temperatura, 20 de pressão, fluxo de massa e calor e 02 transdutores destinados a grandezas elétricas, como tensão, corrente, potência e fator de potência, consumo, instalados nos produtos a serem testados.

Internamente a CC existe um quadro de conectores para facilitar o manuseio dos diversos sensores, o mesmo acontece externamente à câmara. Do quadro de conectores externo, sai a cablagem que conduzem os sinais até um bastidor intermediário, que por fim é interligado ao sistema VXI (*VMEbus Extensions for Instrumentation*). Esse sistema combina a versatilidade dos protocolos de comunicação GPIB (*General Purpose Interface Bus*) e VISA (*Virtual Instrument Software Architecture*) com uma nova arquitetura de equipamentos de instrumentação, o padrão VME (*Versa Module Eurocard*) que criou um sistema de módulos de instrumentação em placas, que são utilizadas num bastidor ou chassi para a aquisição e tratamento do sinal. Este chassi possui um barramento traseiro de conectores que são especialmente projetados para conferir alta performance aos instrumentos, com o mínimo de perdas e ruído e máxima sincronização.

O sistema de aquisição de sinais é composto basicamente por uma placa multiplexadora Tektronix VX4330, um multímetro de 6.5 dígitos Tektronix VX4237, um outro multímetro de 4.5 dígitos Tektronix VX4234 e um conversor D/A Tektronix VX4730. A placa Tektronix VX4330 realiza a multiplexação dos sinais, podendo ser configurada via *software* para chavear, sinais a um, dois ou quatro fios. É composta de 120 canais (configuração com um pólo positivo e outro negativo) organizados em seis seções de dois blocos cada, totalizando 12 blocos de 10 canais adquirindo sinais a dois fios (exemplo: sinais de termopares), e pode ser configurado para disposições diferenciadas, como por exemplo a união de seções em série para aumentar o número de canais medindo a dois fios, por exemplo, ou constituir uma única seção de 240 pontos de leitura. Possui conectores de 160 pinos padrão *DIN*, com cabo especial dotado de blindagem contra interferências eletromagnéticas.

Tendo sido devidamente recebidos e organizados (*queued*), os sinais são encaminhados ao multímetro Tektronix VX4237. Esta unidade pode ter o comando de *trigger* programável, realizar até 1000 leituras por segundo, efetuar calibração automática programável, e auto-diagnóstico. A resolução é selecionável para 6.5 dígitos (seis-e-meio dígitos – resolução = 0,0000001 V), 5.5 ou 4.5 dígitos, além de permitir a seleção de medição entre tensão, corrente e resistência a dois ou quatro fios.

O sistema é conectado ao PC por meio de uma placa *VXI-MXI-2* (*National Instruments*), onde é controlado por um programa especialmente desenvolvido que permite o acompanhamento e manipulação dos dados assim como sua visualização (Mendes, 2000).

2.1. SISTEMA DE MEDIÇÃO DE TEMPERATURA

A leitura de temperatura é realizada por termopares tipo T e utilizando uma junta de referência, conforme Fig. 1. A junta de referência constitui de um bloco isotérmico de alumínio com dimensões de 300 mm de diâmetro e altura de 400 mm, com 102 furos usinados com diâmetro de 8 mm por 250 mm de profundidade. Os furos são preenchidos com óleo

lubrificante, com o objetivo de melhorar o contato térmico. Em razão de sua grande capacidade térmica e uma isolamento externa, consegue-se uma grande estabilidade em sua temperatura. A temperatura de referência do bloco é determinada através de três termorresistores (sensores tipo PT100) que permanecem inseridos no mesmo.

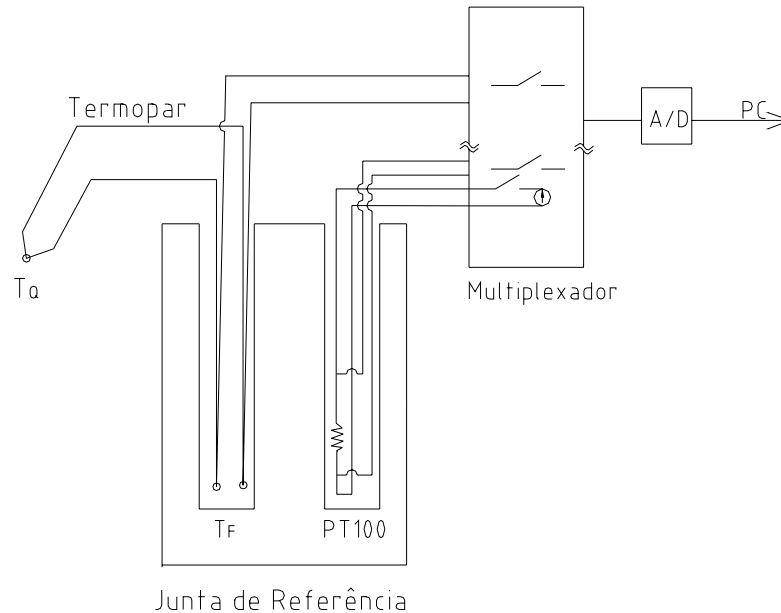


Figura 1. Esquema de uma junta de referência (A ilustração é apenas esquemática, não representando a especificação real)

Os termopares são calibrados em relação ao ponto de fusão da água (0°C), obtendo-se uma curva de temperatura em função da tensão medida, que pode ser expressa através do seguinte polinômio:

$$T = a_0 + a_1\varepsilon_0 + a_2\varepsilon_0^2 + \dots + a_n\varepsilon_0^n = f(\varepsilon_0) \quad (1)$$

onde os coeficientes a_0, a_1, \dots, a_n são características de cada termopar.

Ocorre que a temperatura do bloco da junta de referência é diferente da temperatura de calibração. Moura (1993) mostra um tipo de compensação desse problema que pode ser programado via *software*, utilizando a temperatura determinada pelas termorresistências, a partir da equação abaixo:

$$T_Q = f(\Delta\varepsilon_{Q-F} + f^{-1}(T_F)) \quad (2)$$

onde T_F é a temperatura da junta de referência, medida pelo sensor PT100, T_Q é a temperatura a ser medida e $\Delta\varepsilon_{Q-F}$ é a tensão gerada pelo termopar, correspondente à diferença de temperatura entre T_Q e T_F . Esse esquema de compensação pode ser visualizado graficamente na Fig. 2.

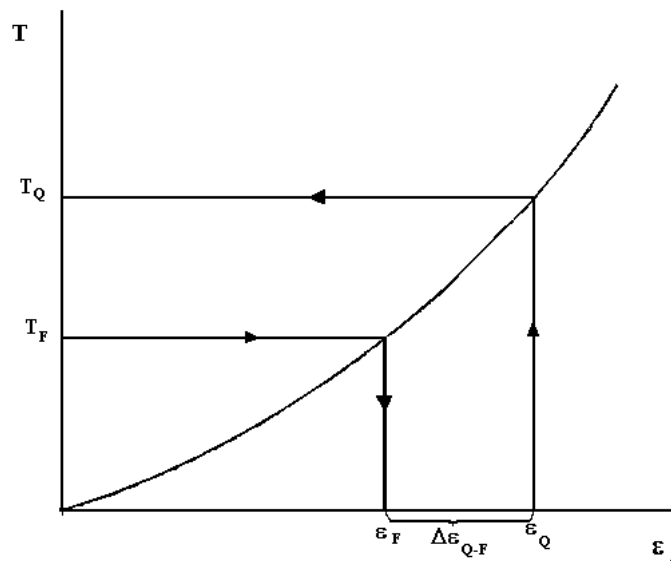


Figura 2. Representação gráfica da compensação da temperatura da junta

2.2 Calibração e verificação dos elementos sensores de temperatura

Os termopares tem a descrição de seu processo de calibração dividido em duas partes, de acordo com o seu uso: os que são usados para instalação no sistema a ser estudado, e os internos ao sistema de medição, isto é, aqueles que fazem parte da cablagem interna da CC. Os primeiros têm suas características levantadas a partir das características metroológicas do tipo de termopar usado na junta. As características se resumem aos coeficientes do polinômio característico do termopar.

A leitura do sinal dos termopares internos para calibração será feita através do equipamento Omega CL8300, que injeta um sinal de tensão compatível com a ordem de grandeza dos termopares. Esse sinal é lido pelo sistema de aquisição VXI, e a diferença correspondente à leitura injetada corresponde ao erro.

Os termorresistores foram adquiridos calibrados de uma empresa rastreada. Seu método de calibração consiste na comparação da medição da temperatura de um termorresistor padrão com a do sensor calibrado, e a determinação da resistência esperada naquela temperatura. É assim estabelecida a partir dos dados obtidos a equação característica do sensor, da forma (Moura, 1993):

$$R_t = R_0 (1 + AT + BT^2) \quad (3)$$

Onde:

T = Temperatura a medir;

R_t = Resistência na temperatura a medir;

R_0 = Resistência em $T = 0^\circ\text{C}$;

A, B, N = Constantes características do material do sensor, constantes do certificado de calibração.

2.3 Calibração dos Transdutores de Pressão

Os transdutores de pressão (fabricação HBM) usados na CC utilizam extensômetros de resistência (*strain gages*), que convertem a deformação neles ocasionada por uma força em uma tensão que tira do equilíbrio o circuito de uma Ponte de Wheatstone.

Para que fosse feita a calibração desses sensores, é necessário um aparelho que forneça um valor de pressão de referência para a comparação entre essa excitação e o que é adquirido pelo transdutor, o que foi conseguido através do uso de uma máquina de peso morto (Ashcroft tipo 1305D).

A calibração foi realizada com o mesmo sistema de aquisição que será efetivamente utilizado nas medições reais: alimentação do transdutor a partir da placa VX4730 (placa conversora D/A), chaveamento do sinal de pressão pela placa VX4330 e leitura pela placa VX4237. A alimentação do transdutor, que demanda uma tensão de 0 a 12V, foi feita nos níveis de 5V e 10V, de modo a verificar qual delas iria conferir a mínima dispersão da medição.

Foi notado que não houve variação significativa das características metrológicas dos transdutores ao variar a tensão de alimentação de 5V para 10V. A dispersão das medições nos dois casos permaneceu entre 0,001% até 0,05%, sendo que numa média em torno de 0,004%, ou seja, dentro do especificado pelo fabricante, que admite um erro máximo de 0,15%. Decidiu-se então usar como tensão padrão de alimentação a de 5V, garantindo que a medição não chegue ao final da faixa de operação da melhor resolução do voltímetro.

6. DETERMINAÇÃO DO GRADIENTE DE TEMPERATURA VERTICAL DA CÂMARA CLIMATIZADA (CC)

Da mesma forma que os produtos testados e os resultados dos ensaios devem seguir o conteúdo das normas que regem a construção e teste de sistemas de refrigeração, assim também se aplica para os dispositivos de teste. A câmara, por ser o elemento essencial nesse contexto, deve ter suas características de desempenho bem definidas para que se tenha uma fonte segura de avaliação do produto, a partir da estabilidade das características ambientais a ele fornecidas no momento do teste.

As normas da *ISO*, atualmente seguidas como referência para ensaios pelas organizações normativas ao longo do mundo, ditam certas características que devem ser alcançadas pelas câmaras climatizadas em condições de ensaio, de modo que o laboratório possa ser credenciado para a realização de ensaios. Dessa forma, faz-se necessário que a CC seja analisada quanto à sua capacidade de obter tais características.

A norma *ISO* 8561 (1998) determina que a temperatura em cada ponto de medição seja mantida constante dentro de $\pm 0,5K$ da temperatura nominal requerida para o ensaio.

Outra característica determinada diz que o gradiente vertical da CC, isto é, a diferença entre as temperaturas medidas na vertical, desde o chão até uma altura de 2 m, não deve exceder 2K/m. Por fim, é arbitrado que a diferença máxima entre a temperatura da superfície e a do ambiente de teste não pode ultrapassar 1,5K; caso contrário, deverá ser construída uma plataforma de altura tal que atenda a norma para a região inferior do produto.

Faz-se necessário então um procedimento para a determinação destes dados. A primeira providência diz respeito à monitoração das temperaturas. Está é feita por meio de termopares do tipo massa (termopares inseridos dentro de um bloco de cobre para aumentar a constante de tempo térmica do sensor) que são posicionados em planos determinados ao longo da altura de 2 m tomada do chão da CC.

Considera-se a colocação de quatro produtos no interior da câmara (condição mais crítica), e os mesmos possuindo dimensões de 0,6 m de largura por 0,7 m de profundidade. A norma

ISO 8561 (1998) recomenda que os termopares para a medição da temperatura ao redor do produto estejam numa distância de 300 mm das paredes externas do produto. O estudo do *layout* dos produtos mostra que os espaços entre as laterais dos produtos são de 433 mm. Para que cada produto tivesse seu termopar de controle de temperatura da lateral, o espaço requerido deveria ser maior que 600 mm, o que fez com que fosse adotado somente um termopar para esses pontos.

No lado paralelo à parede lateral dos produtos, cogitou-se a hipótese de se usar somente um termopar no espaço de 900 mm. No entanto, como o vão é grande, corre-se o risco de não se monitorar com confiança a temperatura, ainda mais que a velocidade do ar insuflado é maior. Isso fez com que fossem adotados dois sensores na malha. Para os três planos de medição, tem-se então o total de 30 termopares.

O ensaio deverá ser conduzido nas seguintes temperaturas:

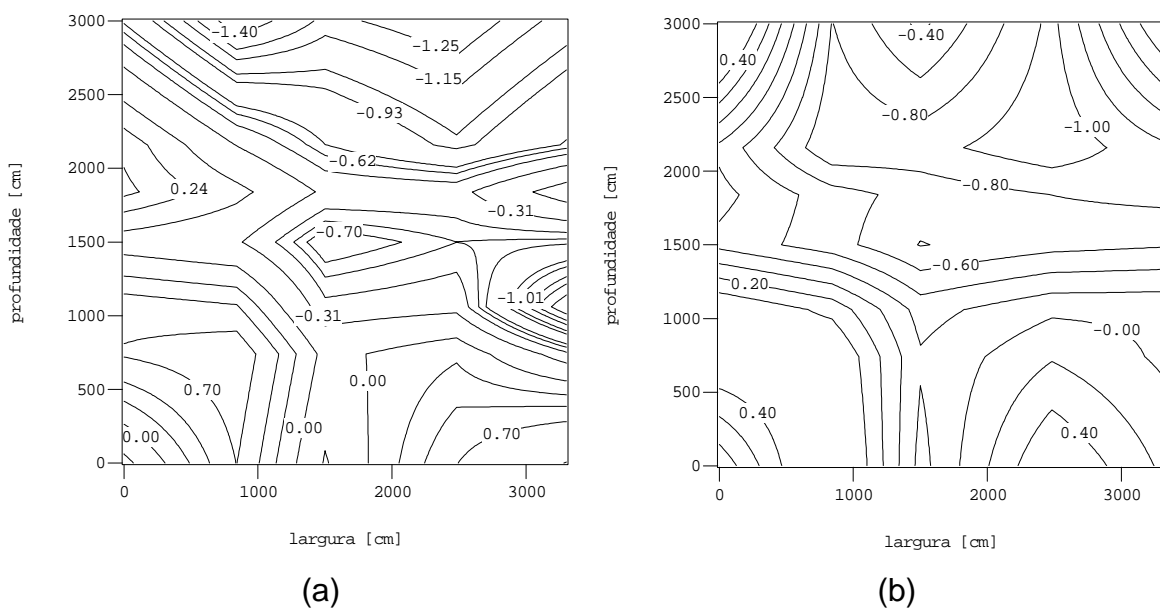
- Temperaturas de ensaios previstas nas normas ISO: 10°C, 18°C, 32°C, 43°C;
- Temperaturas no limite inferior da CC: 0°C e -10°C;
- Temperaturas no limite superior da CC: 50°C e 60°C.

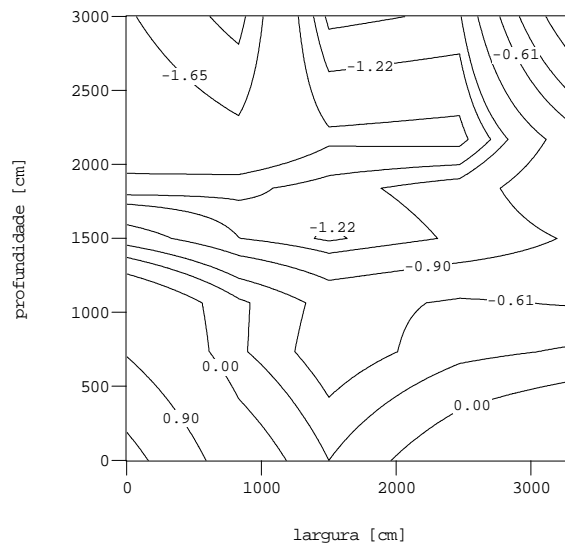
O tempo de ensaio para cada temperatura será de 24h, correspondente ao tempo de aquisição de dados para o Ensaio de Determinação do Consumo de Energia, e considerado por isso apropriado às necessidades mais imediatas do Laboratório de Sistemas Térmicos.

7.RESULTADOS

C Conforme descrito, segue uma análise da distribuição espacial e temporal de temperatura do ar no interior da câmara nas Figuras 3 a 5.

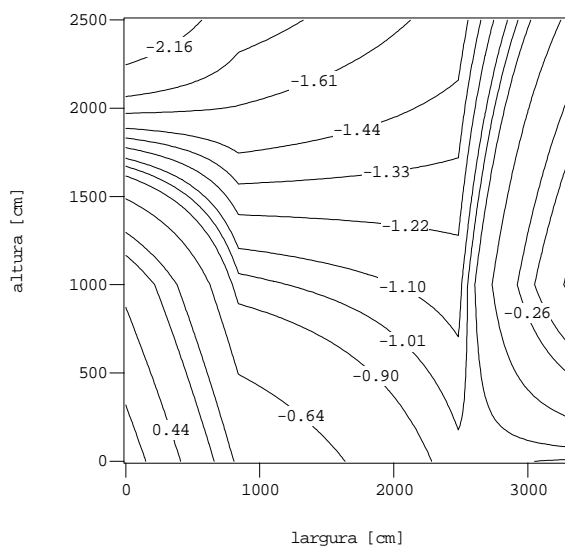
As Figuras 3 e 4 apresentam a distribuição espacial de temperatura em três camadas. Essas camadas encontram-se distanciadas de 1m, a primeira junto ao piso e depois a 1m e 2m de altura. Nota-se, através de análise do gradiente de temperatura, uma conformidade com a norma ISO.



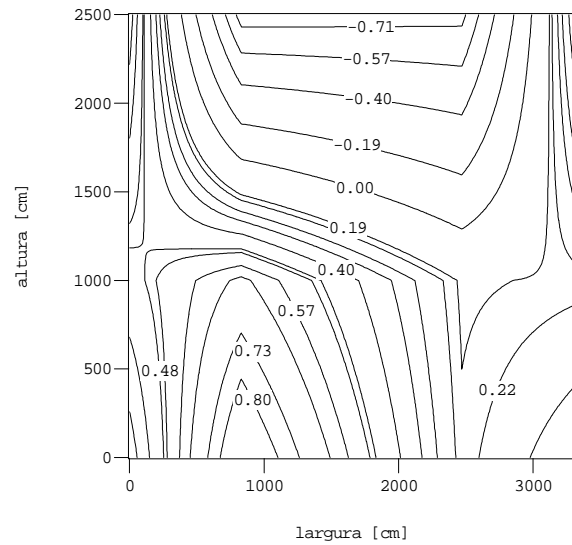


(c)

Figura 3. Diferença de temperatura [K] em torno do ponto de ajuste (32°C),
a) piso, b) 1 m de altura, c) 2 m de altura



(Frente)



(Fundos)

Figura 4. Diferença vertical de temperatura (K) em torno do ponto de ajuste (32°C)

Mostra-se, na Figura 5, a evolução da temperatura no tempo de um dos sensores durante o ensaio, onde observa-se concordância com a norma, pois a variação de temperatura nunca ultrapassa 0,5K.

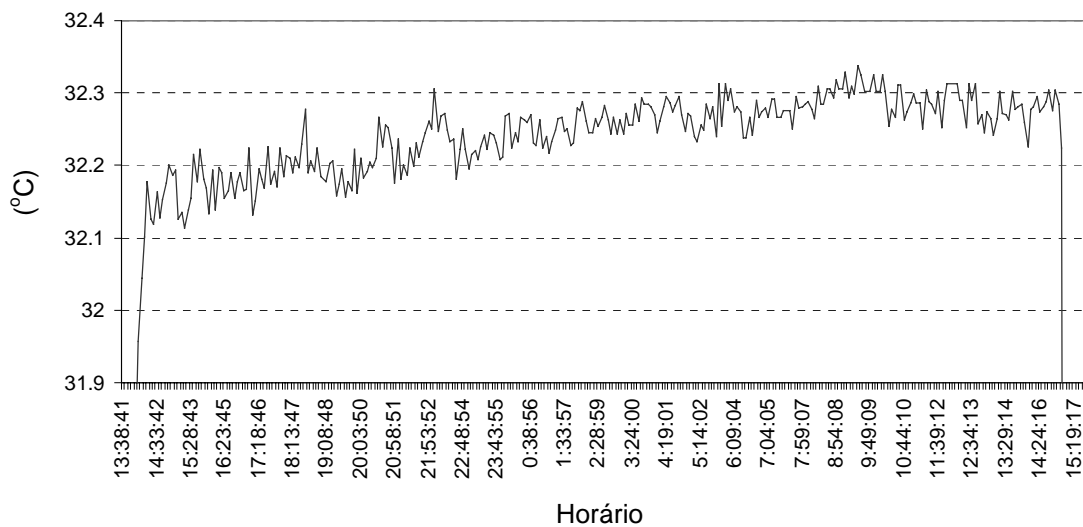


Figura 5. Evolução temporal do sensor 32, do teste de estabilização do dias 12 e 13/1/00, Ponto de ajuste da câmara: 32°C, Média de Temp. 32,21°C, Temp. Máxima 32,33°C, Temp Mínima 32,11°C

8. CONCLUSÃO

Descreveu-se neste trabalho os procedimentos utilizados para a análise e calibração de uma Câmara Climatizada para avaliação de desempenho termodinâmico de sistemas. A documentação desta etapa é necessária para a posterior certificação do LST/PUCPR para a realização destes ensaios, seja em sistemas de refrigeração e/ou aquecimento. As medidas obtidas demonstram que o equipamento está de acordo com as normas *ISO 8561* e *7371*.

9.REFERÊNCIAS

- International Standardizing Organization. Household refrigerating appliance – Refrigerators, refrigerators-freezers, frozen food storage cabinets and food freezers cooled by internal forced air circulation – Characteristics and test methods, *ISO 8561*. Suíça, 1998.
- International Standardizing Organization. Household refrigerating appliance – Refrigerators with or without low-temperature compartment – Characteristics and test methods, *ISO 7371*. Suíça, 1998.
- Mendes, N., Moura, L.M. , Mendonça, K. C.Possobom, A. L. P.Erzinger, A. Jr; Oresten, L. F., 2000, “Metodologia e Software para ensaio de Sistemas Térmicos”, CONEM.
- Moura, L. M., 1993, “Desenvolvimento de um Protótipo de Equipamento de Placa Quente Protegida”. Florianópolis, Dissertação de Mestrado apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina.