

CALIBRAÇÃO DE PSICRÔMETROS

Ernani Felix Balestrin

Orientador: Prof. Paulo S. Schneider

Área de Concentração: Ciências Térmicas

RESUMO:

Este trabalho apresenta a montagem de um aparato para calibração de sensores para umidade relativa (UR). A montagem da bancada é descrita e os procedimentos estatísticos de calibração são apresentados. Os psicrômetros utilizados indicam a UR através da medida da temperatura de bulbo seco (Tbs) e úmido (Tbu) do ambiente e são empregados 2 categorias de sensores (termistores e termoresistores) e a calibração é feita por comparação com um psicrômetro de termômetros de vidro com mercúrio.

ABSTRACT:

PSICROMETER'S CALIBRATION

This work presents an apparatus for calibration relative humidity(RH). The measurement devices set-up of the apparatus is described and the stastitics procedures of calibration are showed. The psicrometers utilized indicate the relative humidity through the measurement of the dry bulb and humid bulb temperatures of the environment two comparison types of thermometry devices (thermistors and thermoresistors)are employed and the calibration is performed by comparison with a mercury in glass thermometer psicrometer.

PALAVRAS CHAVES:

Umidade, Temperatura, Calibração, Sensores, Incerteza de medição.

ÍNDICE

Pag.

Introdução -----	2
Fundamentação Teórica -----	2
Procedimento Experimental-----	5
Resultados-----	8

Conclusões-----	13
Bibliografia-----	13
Anexos-----	14

1.INTRODUÇÃO

A presença ou ausência de vapor d'água no ar ou em outros gases influencia uma ampla faixa de processos físicos, químicos e biológicos tais como a secagem de cereais e a fabricação de componentes eletrônicos. Deste modo, as medições de umidade são importantes para diversos processos industriais e, para alguns deles, são parâmetros críticos que influenciam os custos do processo, a qualidade do produto, a saúde e a segurança.

Para medir a umidade relativa (UR) do ar ambiente empregam-se psicrômetros que podem ser baseados em diversos princípios físicos. Sua calibração pode ser obtida em câmaras de ensaio com temperatura e conteúdo de umidade controlados ou ainda com o emprego de soluções salinas supersaturadas.

2.FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1)Umidade

Segundo a American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers a Psicrometria estuda as propriedades termodinâmicas do ar úmido e o uso destas propriedades na análise das condições e processos que envolvem o ar úmido.

O ar seco é uma mistura de diversos componentes gasosos, com composição relativamente constante, entre eles nitrogênio, oxigênio, argônio, dióxido de carbono entre outros mais raros.

O ar atmosférico é uma mistura de ar úmido mais contaminantes como fumaça, pólen, poluentes gasosos e particulados. A Atmosfera Padrão é considerada ao nível do mar, temperatura 15°C e pressão 101,325kPa.

O ar úmido é uma mistura binária de ar seco e vapor d'água. A quantidade de vapor d'água no ar úmido varia de zero (ar seco) até um máximo que depende da temperatura e pressão. Este máximo é a saturação, um estado de equilíbrio entre o ar úmido e as fases condensadas d'água (líquida ou sólida). Como o ar úmido é uma mistura binária, a sua pressão p vale:

$$p = p_a + p_w \quad (1)$$

onde p é a pressão total da mistura, p_a , a pressão parcial do ar seco e p_w , a pressão parcial do vapor d'água. A pressão parcial do vapor d'água também varia desde zero (ar seco) até um máximo

(saturação) que depende da temperatura da mistura. Esta pressão é aproximadamente a pressão de saturação do vapor d'água na temperatura em que está a mistura. A saturação ocorre quando a pressão parcial de vapor d'água na mistura atinge a pressão de saturação do vapor d'água na temperatura em que está a mistura. Esta pressão aumenta exponencialmente com a temperatura. A temperatura da mistura é a temperatura indicada por um termômetro em contato com esta mistura. Esta temperatura é medida por um termômetro com bulbo seco, o que define o nome desta propriedade como temperatura de bulbo seco, abreviada de T_{bs} .

A umidade relativa ϕ é definida como a relação entre fração molar do vapor d'água x_w em uma dada amostra de ar úmido e a fração molar x_{ws} do ar saturado na mesma pressão e temperatura:

$$\phi = x_w / x_{ws} \text{ que leva à } p_{pv} / p_{sat} \text{ que pode ser dado por } \cong m_{va} / m_{vasat} \quad , \quad (2)$$

onde p_{pv} é a pressão parcial de vapor, p_{sat} é a pressão de saturação do vapor d'água, m_{va} é a massa de vapor d'água e m_{vasat} é a massa de vapor d'água na saturação.

Para qualquer estado do ar úmido, existe uma temperatura T_{bu} na qual água líquida (ou sólida) evapora no ar para levá-lo à saturação nesta mesma pressão e temperatura.

2.2 Psicrômetros

O psicrômetro consiste em dois termômetros, sendo que o bulbo de um deles é coberto por um tecido molhado com água. Quando o bulbo úmido é colocado em uma corrente de ar, a água evapora do tecido, existindo uma temperatura de equilíbrio chamada temperatura de bulbo úmido. Este processo não é de saturação adiabática, que define a temperatura de bulbo úmido termodinâmico, mas é uma transferência de calor e massa simultâneos no bulbo úmido. O mecanismo fundamental deste processo é descrito pela Relação de Lewis, que relaciona o coeficiente de evaporação com o de convecção. O termômetro de bulbo úmido mede a temperatura com que a água evapora no ar. A diferença de temperatura (Δt) indica a UR do ar. Se o ar tem alta UR, o Δt é pequeno; na saturação é zero, porque não há evaporação de água. Se a umidade relativa é baixa, o Δt é grande. Se o ar não está saturado, pode ocorrer evaporação, que retira calor do bulbo diminuindo a temperatura do termômetro. O calor que entra mantém a evaporação da água. A evaporação aumenta a umidade do ar junto ao bulbo levando este ar a saturação. Este ar saturado inibe a evaporação tendo que ser retirado por ventilação. A temperatura de orvalho, t_o , é a temperatura do ar úmido saturado na mesma pressão p e com o mesmo conteúdo de umidade que uma amostra de ar úmido.

2.3 Calibração

Segundo Holman (1994) a calibração de todos os tipos de instrumentos é importante porque oferece a oportunidade de verificar o instrumento em relação a um padrão conhecido e portanto, reduzir os erros de exatidão. O procedimento da calibração envolve uma comparação do instrumento que se quer calibrar com: (1) um padrão primário, (2) um padrão secundário com exatidão mais alta que o instrumento que se quer calibrar, (3) uma propriedade física conhecida. A importância da calibração deve sempre ser levada em conta porque com ela se estabelece a incerteza dos instrumentos.

Uma especificação não é a mesma coisa que uma calibração e também nunca a substitui. A calibração é um processo de comparação de um instrumento de medição contra um padrão para o mesmo tipo de medição, cuja finalidade é identificar eventuais desvios ou erros sistemáticos nas leituras. O resultado de uma calibração é normalmente resumido em um certificado de calibração, listando quaisquer correções que necessitam ser aplicadas aos valores indicados pelo instrumento, juntamente com a estimativa da incerteza da calibração, e outras informações relevantes. A rastreabilidade a padrões reconhecidos é a melhor maneira de assegurar a exatidão das medições, e ela proporciona a consistência das medições entre usuários em diferentes épocas e locais. Uma medição rastreável é aquela que pode ser relacionada a padrões nacionais ou internacionais, através de uma cadeia contínua de comparações.

2.4 Medições de Umidade

Segundo Santos et al. (1998), um tipo de método para medir a umidade é do tipo gravimétrico utilizado para propósitos de calibração. Este procedimento consiste em expor uma amostra da mistura ar mais vapor de água a substâncias químicas adequadas que absorvem a água do ar. A seguir pesa-se a massa das substâncias químicas obtendo-se a quantidade de vapor de água absorvido. Com este método pode-se alcançar uma precisão de 0,1% segundo Holman(1994).

Existe uma relação analítica definida entre as temperaturas de bulbo seco, bulbo úmido e ponto de orvalho. Assim, obtendo-se duas destas temperaturas, pode-se calcular a umidade. O método clássico que se usa para determinar a umidade em espaços abertos amplos consiste em medir as temperaturas de bulbo seco e de bulbo úmido com um psicrômetro de cadeia que é constituído de dois termômetros postos a girar a uma velocidade de aproximadamente 5m/s e se registram ambas temperaturas.

Quando se deseja efetuar medições sobre uma ampla faixa de umidades pode-se empregar vários sensores de tal forma que cada um deles possua uma cobertura adequada para alguma faixa das umidades relativas. Em geral, não se utiliza um só transdutor para medir mais que 10% de faixa de umidade relativa. A exatidão deste dispositivo flutua em torno de 1,5% da umidade relativa e pode ser usado com temperaturas que variam de 4°C até 65°C.

A umidade relativa pode ser também medida realizando-se uma medição da temperatura do ponto de orvalho. Para este propósito a técnica convencional consiste em resfriar uma superfície muito polida (espelhada) até que a água comece a se acumular na superfície. Pode-se melhorar a sensibilidade deste processo de medição, utilizando-se uma fotocélula que detecte um raio de luz que seja refletido pela superfície espelhada. Nestas condições ao iniciar-se a condensação, a intensidade do raio refletido diminuirá e se poderá utilizar este sinal para registrar a temperatura do espelho como o ponto de orvalho. Temos assim que a temperatura que a água condensa é a temperatura de orvalho. Para o registro contínuo do ponto de orvalho se pode modificar a técnica do espelho e fotocélula conectando o espelho a uma fonte de baixa temperatura tal como um banho de acetona em gelo seco e simultaneamente a um calefator elétrico. Desta forma pode-se detectar o sinal da fotocélula com um circuito eletrônico apropriado e ativar um aquecedor quando o sinal diminui por efeito de acumulação do condensado. O aquecedor continuará funcionando até que a superfície do espelho volte a refletir, o que faria que o sinal da fotocélula aumente reduzindo então a corrente do aquecedor. Basicamente o sistema descrito é um sistema de controle que mantém o espelho à temperatura do ponto de orvalho independente das mudanças do meio ambiente. A medição da temperatura do espelho pode ser feita com um termoresistor que registra continuamente a temperatura de orvalho.

2.5 Termoresistores:

A medição de temperatura por métodos elétricos é muito utilizada porque permite obter um sinal fácil de detectar, amplificar e utilizar para controle de processos. Os termoresistores proporcionam grande exatidão sempre que se leva em conta uma calibração e correções adequadas. O termômetro de resistência elétrica é um medidor muito exato que consiste basicamente em um elemento resistivo que se expõe a temperatura que se quer medir. Desta maneira, a variação da resistência elétrica do material constituirá uma indicação da temperatura. Existem vários tipos de materiais que podem ser utilizados como elementos resistivos. Deve ser lembrado que o termômetro

de resistência de Platina é utilizado na Escala Internacional de Temperatura para uma faixa definida do ponto de fusão do Oxigênio(-182,97°C), ao de fusão do Antimônio(630,5°C), elemento este que foi usado para a calibração dos psicrômetros (Pt100) onde o número 100 indica que este medidor tem 100Ω de resistência elétrica quando a temperatura é de 0°C. A medição da resistência é feita mediante um circuito tipo ponte. Uma das fontes principais de erro destes termômetros é o efeito produzido pela resistência própria dos fios que se conectam com o termoresistor na ponte. Para termoresistores também são empregados semicondutores como resistências sendo estes medidores chamados termistores que tem um coeficiente negativo de resistência por temperatura em contraste ao coeficiente positivo da maioria dos metais. Além do mais a variação da resistência com a temperatura segue um comportamento exponencial em vez de uma relação polinomial como os metais. O termistor é um medidor extremamente sensível e por meio de uma calibração adequada pode-se obter uma precisão da ordem de 0,01°C.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A montagem experimental adotada neste trabalho buscou a obtenção de um ambiente com condições controladas, que servem para calibrar os psicrômetros.

Foram montados 2 arranjos: um com pontos fixos de umidade obtidos por intermédio de banho de sais, e outro com o auxílio de uma câmara de ar com temperatura controlada, onde os psicrômetros são calibrados por comparação. Estas montagens são descritas a seguir:

3.1 Banhos de Sais

A primeira incursão levou a utilização de banhos de sais supersaturados [Güths et al (1996)], onde o ar é mantido a uma determinada umidade relativa, resultante do equilíbrio provocado pelo sal. Através de um banho termostático que mantém a água a uma temperatura constante de 0 a 100°C pode-se regular a temperatura através de um controle que aciona as resistências para o aquecimento da água. Existe ainda um motor elétrico com uma hélice na extremidade do eixo colocada dentro da água para homogeneizar a temperatura do banho. Para baixas temperaturas ,isto é , perto do 0°C deve-se no entanto colocar grande quantidade de gelo pois as resistências atuam somente para o aquecimento ,não tendo este banho sistema de resfriamento. A idéia inicial foi colocar o termômetro de bulbo úmido a ser calibrado no interior de um tubo de ensaio que

contivesse um depósito de água desionizada sendo todo este conjunto colocado dentro de outro tubo de ensaio ,em um arranjo coaxial, sendo este hermeticamente fechado com uma quantidade de uma solução super-saturada de sulfato de amônio ao redor formando uma atmosfera que a 45°C de temperatura deveria ter uma umidade relativa de 79%. O termômetro de bulbo seco foi colocado dentro do banho medindo então a temperatura da água aquecida. O que aconteceu foi que as duas temperaturas(bulbo seco e úmido) tendiam sempre a temperatura do banho pois não havia ventilação no bulbo úmido. Não havia como colocar ventilação e o mesmo comportamento foi verificado para uma solução de bicarbonato de sódio. Desta forma foi abandonada a idéia. Retirando-se então os tubos de ensaio do banho e colocando-os em um recipiente que fosse possível ventilar a mecha mas ainda hermeticamente fechado do meio ambiente foi observado que a temperatura de bulbo úmido sofreu uma pequena queda mas não o suficiente para fazer a umidade relativa chegar a 79%, marcando sim, quase 100%. Desta forma foi abandonada definitivamente a idéia de utilizar pontos físicos fixos de umidade relativa.

3.2 Câmara de Ar com Temperatura Controlada

Foi montado um arranjo composto por um ambiente de mistura do ar, um banho termostático(ver foto em anexo), e diversos acessórios como mostra a figura 3.1 em um desenho esquemático.

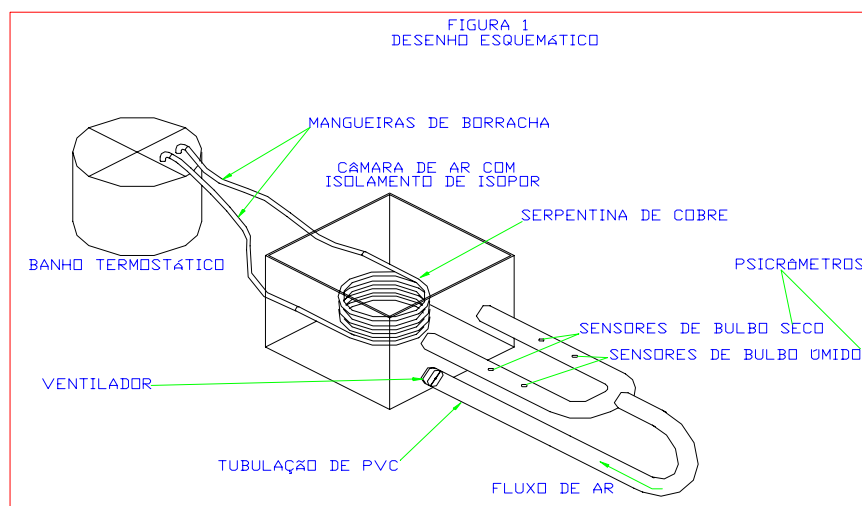


Figura 3.1- Desenho esquemático do aparato de calibração de umidade relativa.

No interior da câmara foi instalado um trocador de calor, formado por uma serpentina de cobre pela qual circula água proveniente do banho termostático. O ar com temperatura controlada

obtida na câmara é levado aos dois psicrômetros, 1 de referência e outro a ser calibrado, por meio de dois ramais de tubos.

O processo experimental adotado foi: aquecer o banho termostático obtendo-se água quente que passa pela serpentina e aquece o ar que encontra-se dentro da câmara que por sua vez é aspirado para fora pelo ventilador fazendo com que o ar quente passe pelos bulbos úmido e seco. O resultado obtido com este arranjo produziu bons resultados mas tem baixa resposta porque a potência do banho termostático não é capaz de promover um aumento significativo da temperatura na câmara de ar. Isto se deve a falta de isolamento das mangueiras de borracha até a entrada da câmara, da falta de isolamento da câmara que é feita de papelão com espessura de apenas 5mm, da falta de isolamento dos tubos de PVC que continham os termômetros e do fato que o ar que entrava não tinha tempo para uma troca eficiente de calor com a serpentina pois logo que entrava por uma abertura feita para isso era aspirado pelo ventilador e também pelo fato de que o ar no interior da câmara não era homogeneizado criando-se zonas estratificadas de ar quente e frio dentro da mesma.

O circuito fechado (ver figuras em anexo) fez-se com as seguintes modificações: colocação de uma tubulação de PVC em forma de "U" na saída da tubulação no lugar onde estava o ventilador onde uma perna do "U" retorna estava na saída da tubulação e a outra retornava para a câmara criando o circuito fechado (figura 3.1); o ventilador foi colocado dentro da câmara ligado à saída da tubulação em "U" de forma que o ventilador aspirava o ar que passava pelos termômetros e o insuflava dentro da câmara na direção de onde encontrava-se a serpentina; e por fim foi feito um isolamento interno à câmara com isopor e folhas de alumínio. Deste modo para temperaturas de 67°C obtiveram-se temperaturas de bulbo seco, ou seja, de ar quente em torno de 41°C sendo possível então realizar as medidas de calibração dos sensores pois tem-se agora uma faixa de temperaturas de 0 a 40°C.

4. RESULTADOS

Primeiramente foi feita uma calibração dos sensores de temperatura utilizados em todos os experimentos através da comparação com um termômetro de líquido-em-vidro com certificado de calibração. Essa calibração foi feita da seguinte maneira: colocou-se o padrão, 2 termômetros de mercúrio, 2 termoresistores Pt100 e 2 termistores AD592AN mergulhados em um banho termostático de modo a marcarem todos a mesma temperatura. Isto foi necessário para saber qual deveria ser a correção a ser adotada para cada um dos medidores. As temperaturas do padrão e dos

2 de mercúrio eram lidas diretamente na escala, os dos Pt100 eram lidos em um CLP (marca Novus) e a saída das temperaturas dos AD(s) foram verificadas via computador. A seguir o gráfico com as temperaturas dos sensores em relação a temperatura do sensor padrão.

Nesta calibração dos termômetros fez-se variar a temperatura de 3 em 3°C e então anotaram-se os resultados. As correções observadas foram de caráter fortemente sistemáticas e foram aplicadas para cada sensor quando da calibração dos psicrômetros.

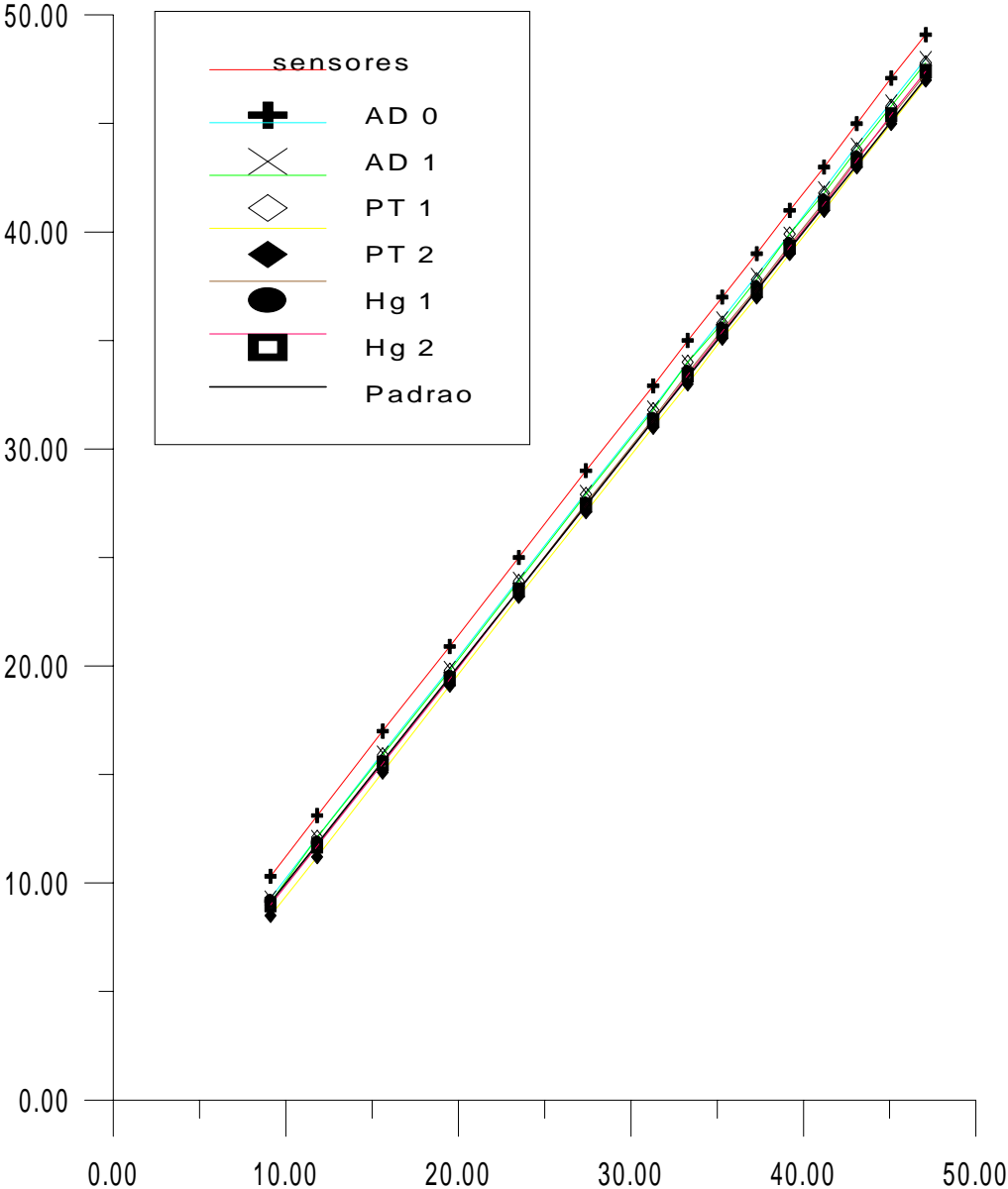
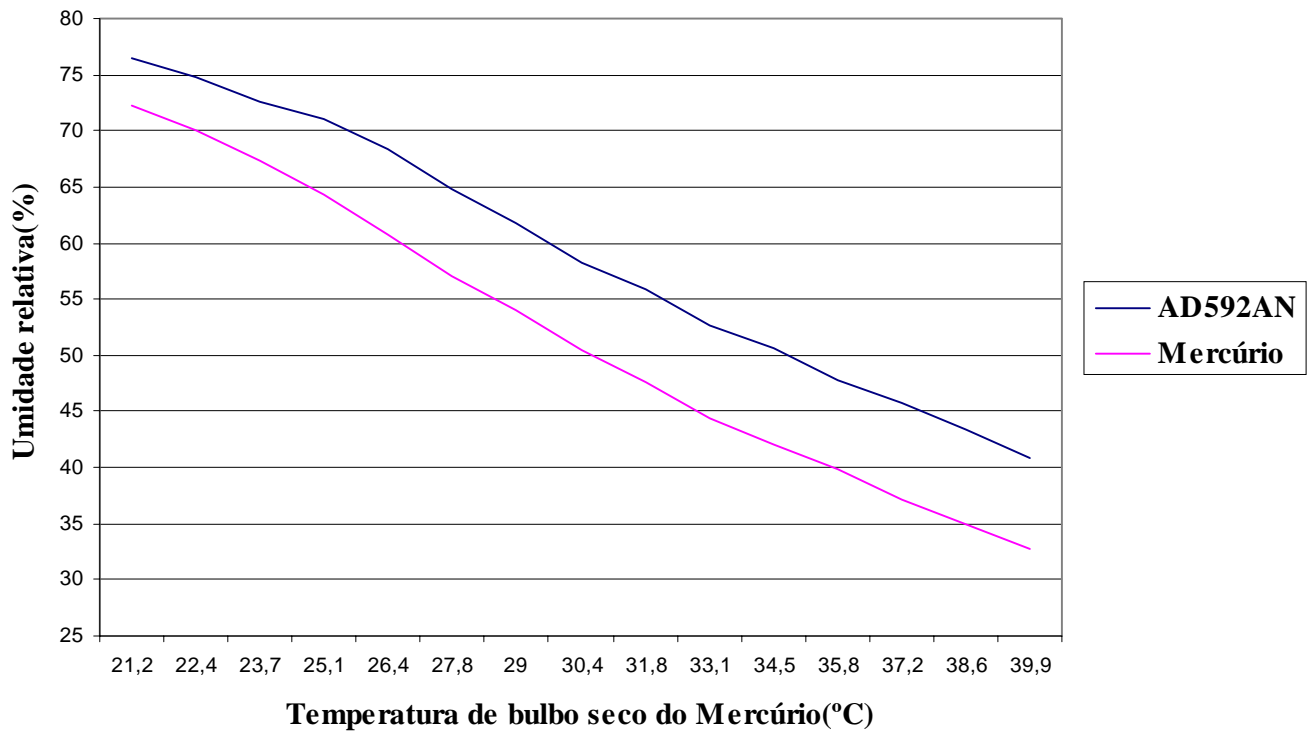


Figura 4.1- Comparação das temperaturas dos sensores em relação ao sensor padrão.

Após a calibração dos termômetros procedeu-se a uma seqüência de calibrações de psicrômetros com sensores Pt100 e AD592AN, calibrados por comparação frente ao psicrômetro de termômetros de mercúrio números 1 e 2, chamado simplesmente de psicrômetro padrão. Foram feitas 3 seqüências de medidas, iniciando-se em torno de 25°C e subindo a temperatura do banho de 3 em 3°C até em torno de 67°C. Para cada sensor obtiveram-se então 3 curvas de calibração. Dos resultados das temperaturas de bulbo seco e úmido de cada psicrômetro era aplicada à correção dos erros sistemáticos e então obtida a umidade relativa para cada medida sendo cada série de medidas composta de 15 pontos. Os dados de umidade relativa foram para uma tabela (ver anexos) e os gráficos a elas associados são mostrados a seguir.

Relação entre umidade relativa e Tbs



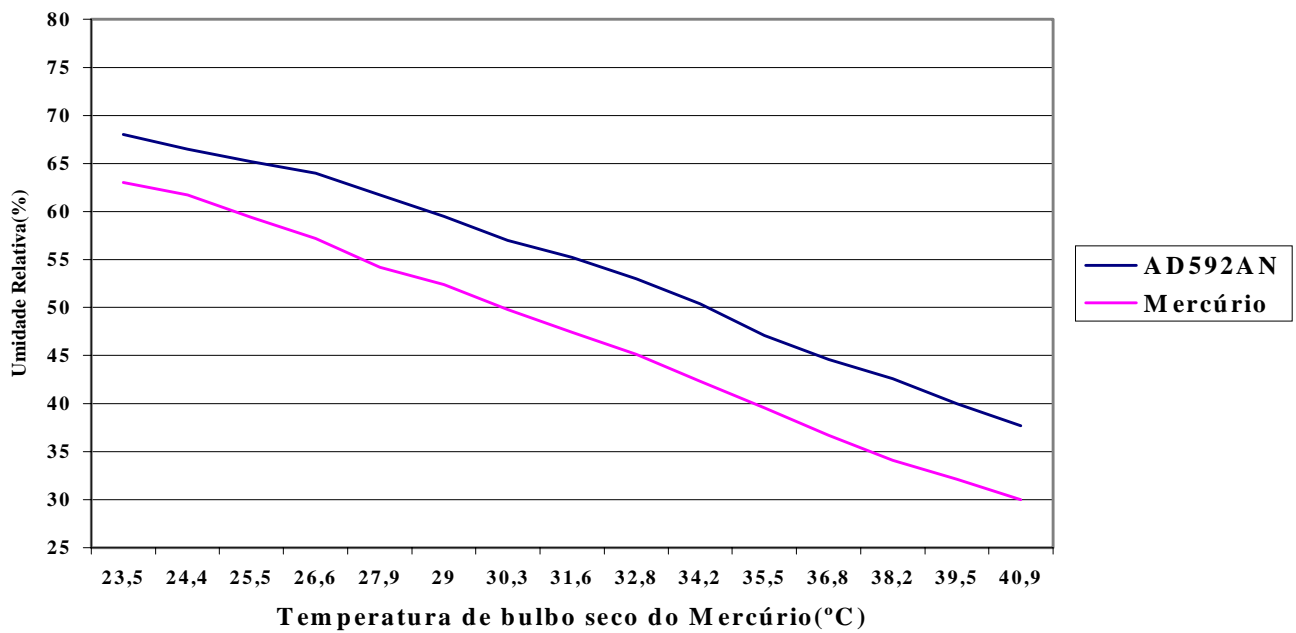
Correção prevista=-5,6%

Incerteza=0,4%

Curva de Calibração: $b(\phi)=-9,9+0,1(\phi-\phi_0)$

Figura4.2.a-Primeira seqüência de medidas usando o psicrômetro com 2 AD592AN

Relação entre umidade relativa e T_{bs}



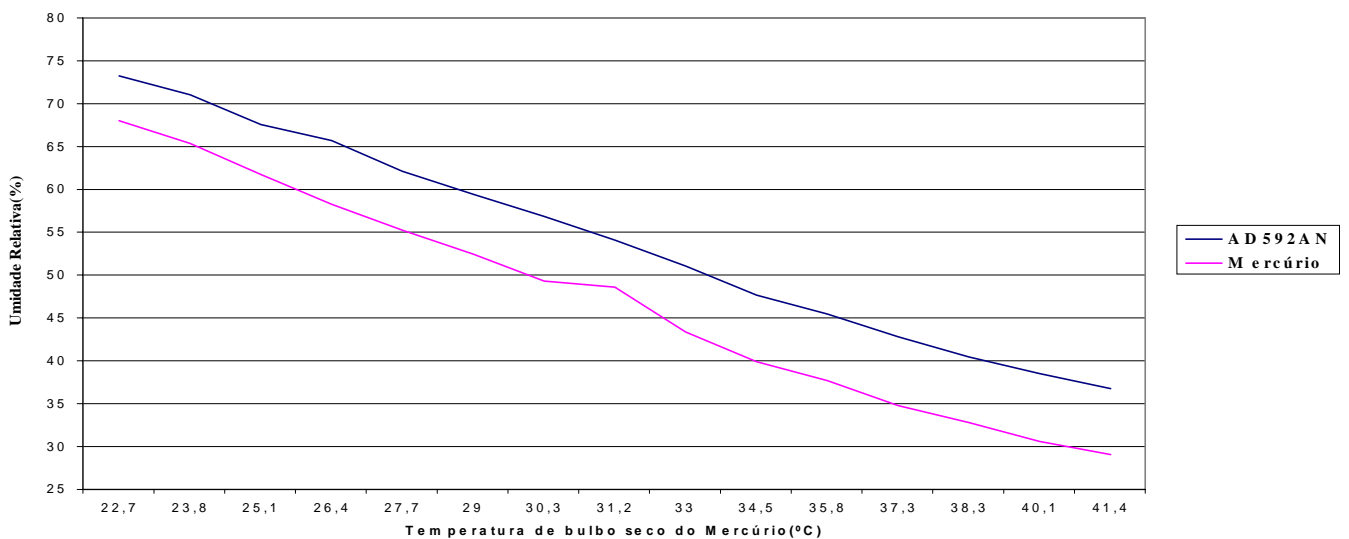
Correção prevista=-5,9%

Incerteza=0,3%

Curva de calibração: $b(\phi)=-9,4+0,1(\phi-\phi_0)$

Figura 4.2.b-Segunda sequência de medidas usando o psicrômetro com 2 AD592AN

Relação entre umidade relativa e T_{bs}



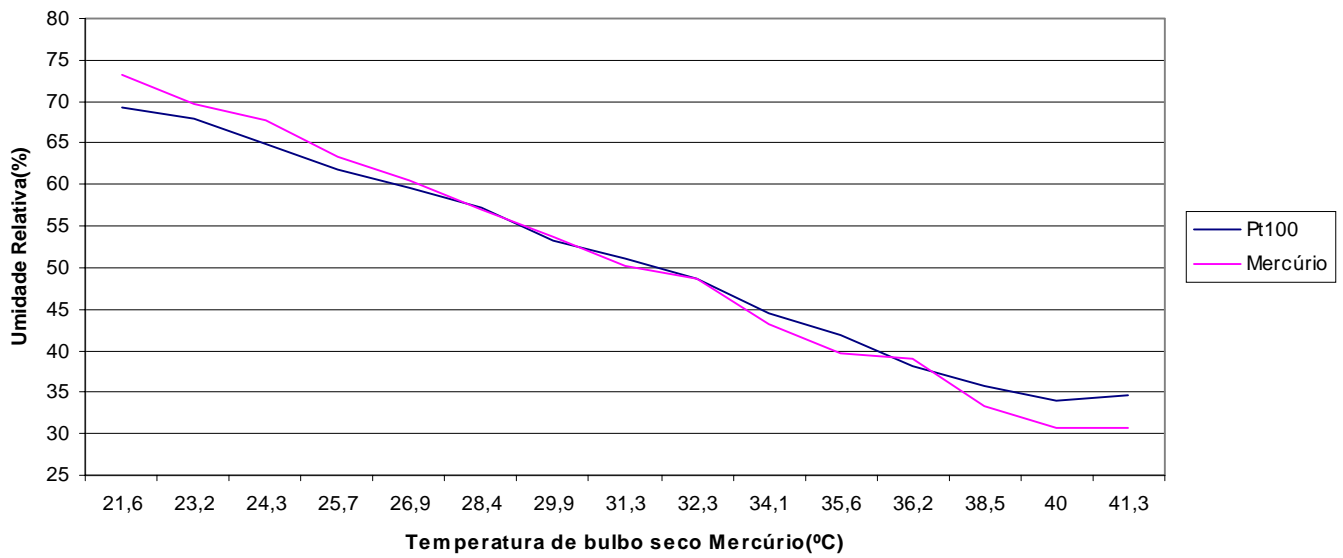
Correção prevista=-6,2%

Incerteza=0,3%

Curva de calibração: $b(\phi)=-8,5+0,1(\phi-\phi_0)$

Figura 4.2.c-Terceira sequência de medidas usando o psicrômetro com 2 AD592AN

Relação entre Umidade Relativa e Tbs



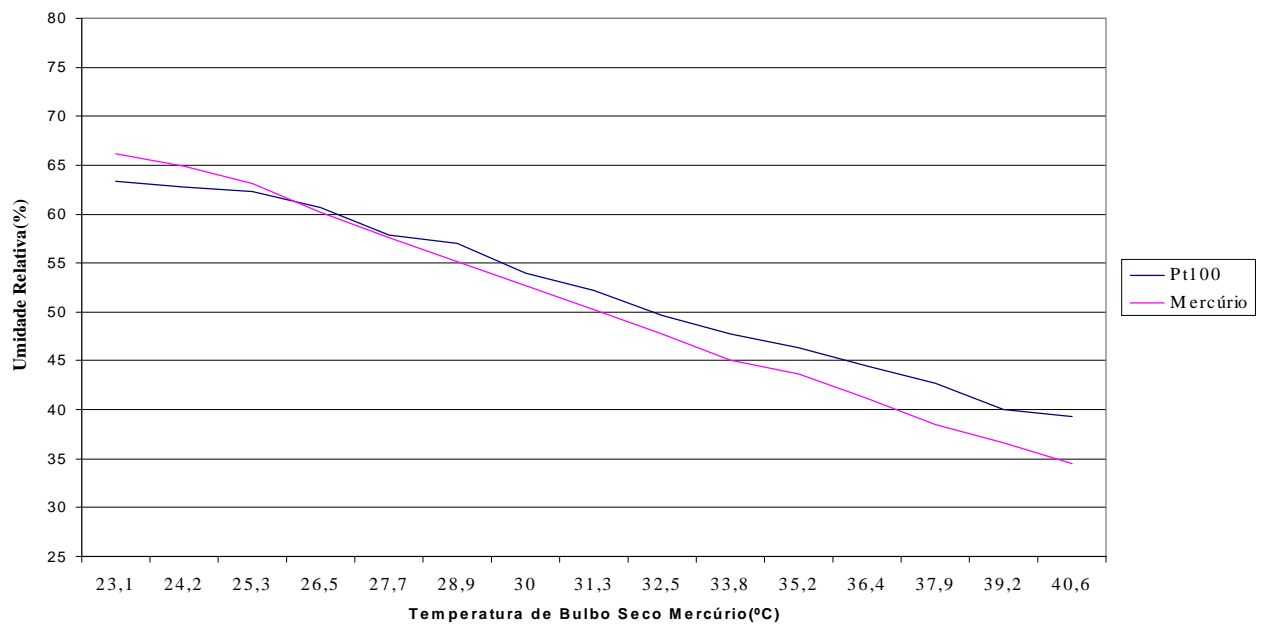
Correção prevista=3,6%

Incerteza=0,6%

Curva de calibração: $b(\phi) = -3,4 + 0,2(\phi - \phi_0)$

Figura 4.3.a-Primeira sequência de medidas usando o psicrômetro com 2 Pt100

Relação entre Umidade Relativa e Tbs



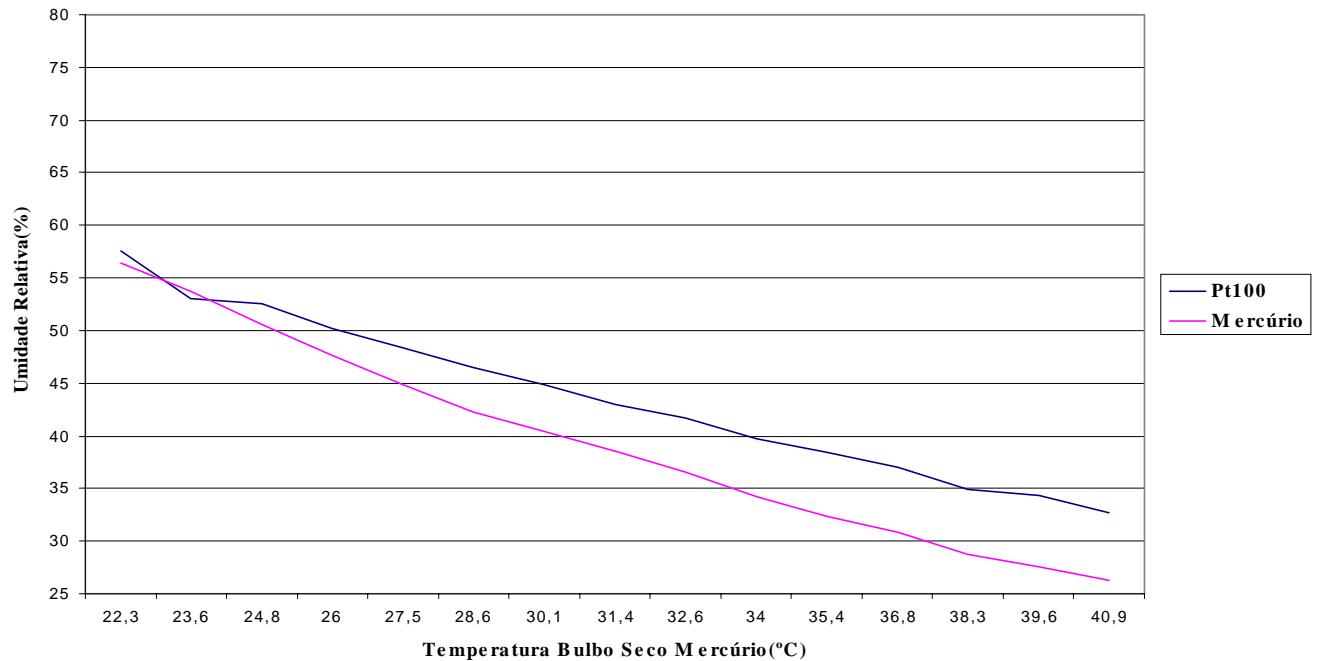
Correção prevista=2,1%

Incerteza=0,4%

Curva de calibração: $b(\phi) = -5,9 + 0,2(\phi - \phi_0)$

Figura 4.3.b-Segunda sequência de medidas usando o psicrômetro com 2 Pt100.

Relação entre Umidade Relativa e T_{bs}



Correção prevista=-0,4%

Incerteza=0,5%

Curva de calibração: $b(\phi) = -9,2 + 0,3(\phi - \phi_0)$

Figura 4.3.c-Terceira sequência de medidas usando o psicrômetro com 2 Pt100.

Os gráficos dos AD(s) mostram que a correção deve ser sempre no sentido de descontar o valor medido da umidade relativa de mais ou menos 6% sendo este número quase constante para a faixa em foi calibrada, isto é, de 25 a 80% de umidade relativa do ar. Já o gráfico dos Pt100 mostra variações muito grandes no valor da correção mas também mostra uma tendência ,não muito clara ,mesmo com poucos experimentos mas que existe e parece ser a seguinte: para altas umidades até mais ou menos 55% o valor da correção é positivo sendo somada ao valor lido da umidade relativa, uma pequena faixa os valor da correção é quase nulo(em torno de 50%) e por fim é negativo, isto é deve-se diminuir o valor medido pela correção prevista, para umidades relativas menores que aproximadamente 50%. Segundo a ASHRAE para um melhor conhecimento do comportamento destes psicrômetros deve ser feito no mínimo vinte(20) sequências de medida para só então termos uma análise estatística dos dados obtidos; no entanto a ênfase é na montagem e funcionamento dos psicrômetros e a análise estatística pode ser abordada em um trabalho posterior. As equações de calibração são apresentadas e deve ser dito que o valor de ϕ_0 para ser correto deve ser calculado seguindo métodos estatísticos mais avançados que fogem ao assunto deste trabalho.

5. CONCLUSÕES

O objetivo que é a calibração dos psicrômetros com saída digital foi alcançado após alguns ajustes e mudanças de enfoque pois o enfoque inicial era calibrar usando pontos físicos conhecidos, sendo que este trabalho pode ser melhorado com o acréscimo de: uma serpentina que contenha apenas água gelada permitindo assim calibrar para temperaturas mais baixas; utilizar um vaporizador acoplado a câmara para podermos mudar diretamente a umidade do ar ; colocar isolamento nas mangueiras de borracha bem como da tubulação de PVC; fazer um fechamento hermético do circuito de ar ,circuito este que tem hoje vários pequenos orifícios tais como as ligações das mangueiras com a câmara ,da tubulação com a câmara e dos termômetros com a tubulação assim como com o depósito de água destilada com a tubulação.

6.BIBLIOGRAFIA

- Analog Devices , **Data Sheet AD592-REV. A**,USA
- ASHRAE (1997) **ASHRAE Handbook – Fundamentals**, Atlanta.
- ASHRAE STANDARDS 1974 - 41.1-74-1974 **Section on Temperature Measurements**, USA
- ASHRAE STANDARDS 1976 - 41.5-75-1976 **Engineering Analysis of Experimental Data**, USA
- ASTM E 77-92** Standard Test Method For Inspection and Verification of Thermometers, USA
- Schneider, P.S.**, 1998, Planilha Para Cálculo De Curvas De Calibração, Notas de aula da disciplina Medições Térmicas, DEMEC-UFRGS, Porto Alegre.
- Santos, C e Kawakita, K 1998, Métodos De Medição De Umidade De Gases, **MERCOFRIO98**, Porto Alegre.
- Holman, J.P.1977- **Metodos Experimentales Para Ingenieros**, Editora McGraw-Hill de Mexico 1ª Edição, México
- Güths et al (1996), Sistema de Calibração Saturador-Reaquecedor, **Relatório Interno EMC-UFSC**, Brasil

ANEXO

FOTOS

Figuras 1 e 2: a bancada

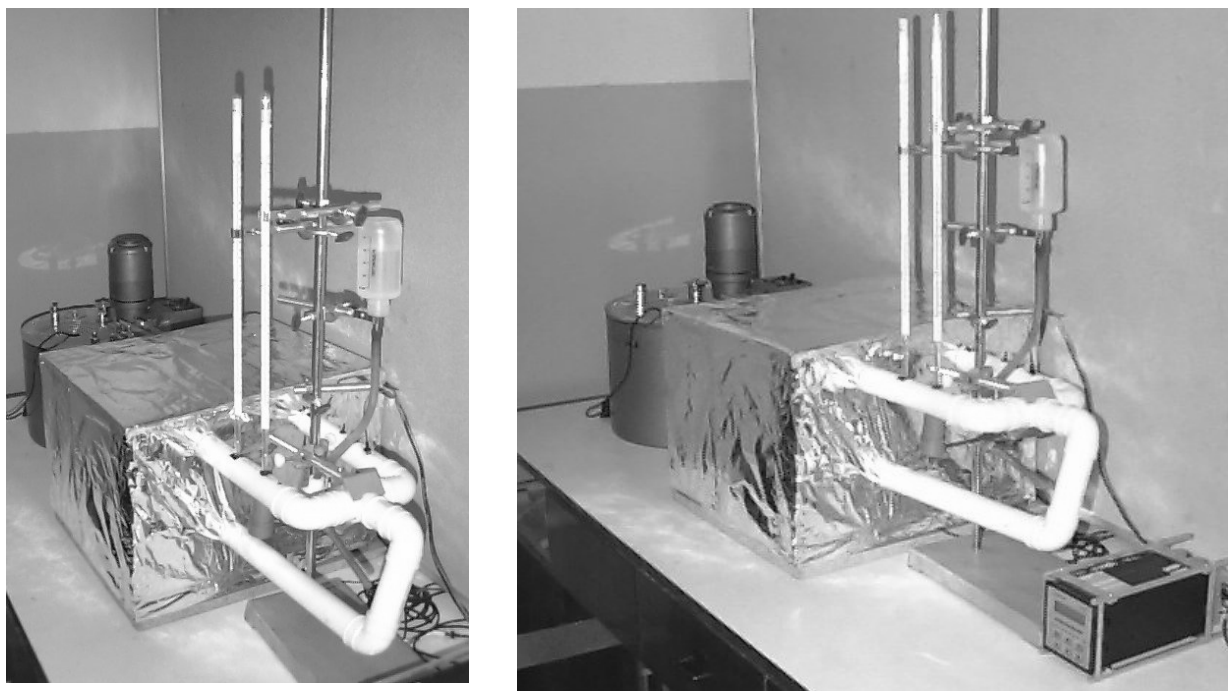
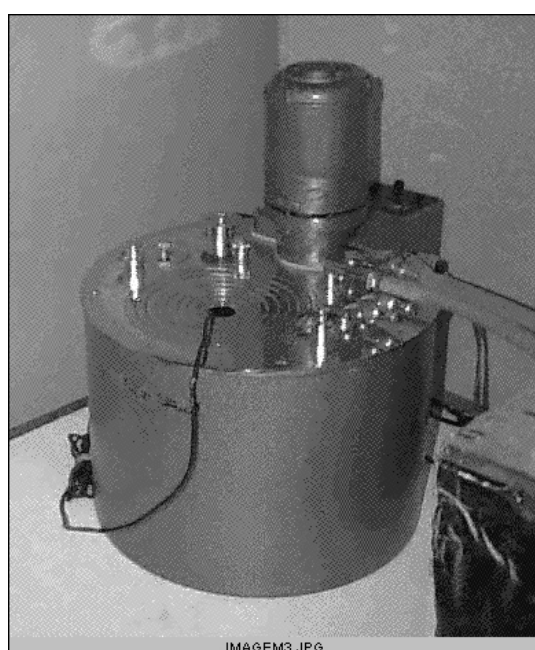


Figura 3: O banho termostático



**Tabela 1 -Planilha para cálculo de curva de calibração
Primeira medição usando psicrômetro AD592AN**

[%]											n=	15	
n	AD	Hg	bk=Hg-AD	qk=AD-Øi	qk^2	bk*qk	b(AD)	bk-b(AD)	(bk-b(AD))^2	uc(bAD)	Øi=	32 %	
1	40,8	32,8	-7,950	8,770	76,913	-69,722	-9,0854	1,1354	1,289051	0,40612	Ø=	76 %	
2	43,4	34,9	-8,480	11,380	129,504	-96,502	-8,8284	0,3484	0,121375	0,36557	D=	30085,2	
3	45,7	37,1	-8,620	13,680	187,142	-117,922	-8,6019	-0,0181	0,000326	0,33177	y1=	-9,948839	
4	47,8	39,8	-7,950	15,790	249,324	-125,531	-8,3942	0,4442	0,197304	0,30292	y2=	0,098458	
5	50,6	42,1	-8,470	18,560	344,474	-157,203	-8,1215	-0,3485	0,121480	0,26929	Correção prevista		
6	52,6	44,4	-8,170	20,610	424,772	-168,384	-7,9196	-0,2504	0,062689	0,24857	b(Ø)= -5,6167 %		
7	55,8	47,6	-8,220	23,810	566,916	-195,718	-7,6046	-0,6154	0,378770	0,22585			
8	58,2	50,4	-7,730	26,150	683,823	-202,140	-7,3742	-0,3558	0,126618	0,21848			
9	61,8	54,1	-7,740	29,810	888,636	-230,729	-7,0138	-0,7262	0,527353	0,22452	Cálculo de incerteza de medição		
10	64,8	57,1	-7,680	32,750	1072,563	-251,520	-6,7243	-0,9557	0,913280	0,24383	s^2	u^2(y1)	u(y1)
11	68,4	60,8	-7,580	36,370	1322,777	-275,685	-6,3679	-1,2121	1,469125	0,28112	0,7125688	0,305555	0,55277
12	71,1	64,3	-6,770	39,050	1524,903	-264,369	-6,1041	-0,6659	0,443478	0,31546			
13	72,5	67,3	-5,130	40,450	1636,203	-207,509	-5,9662	0,8362	0,699259	0,33503	u^2(y2)	u(y2)	r(y1,y2)
14	74,7	70,0	-4,740	42,720	1824,998	-202,493	-5,7427	1,0027	1,005443	0,36858	0,0003553	0,018849	-0,91898
15	76,4	72,2	-4,200	44,360	1967,810	-186,312	-5,5812	1,3812	1,907843	0,39393			
TOTAL			-109,430	404,260	12900,757	-2751,736	-109,4300	0,0000	9,263394				

onde as cores têm o seguinte significado:

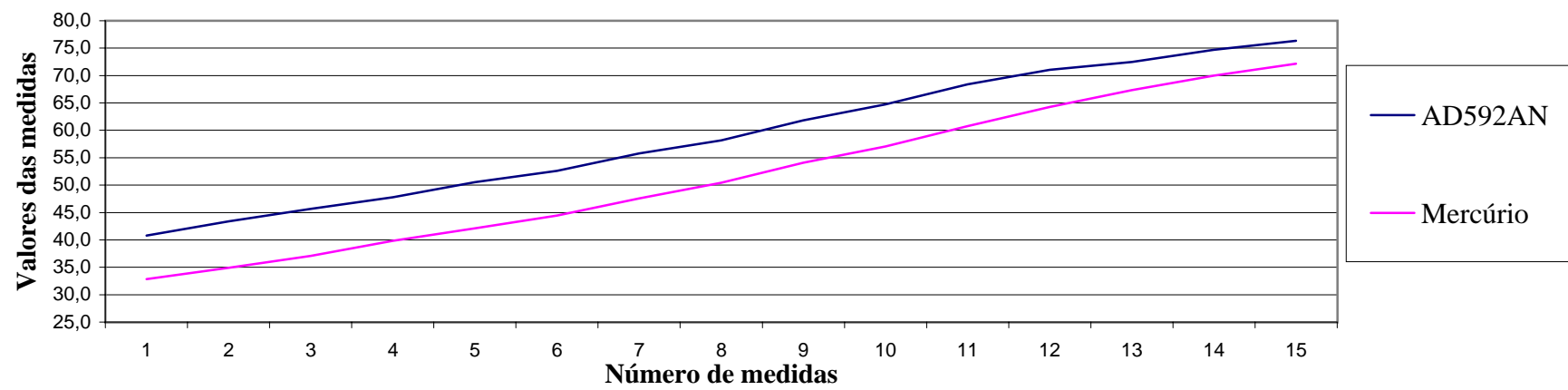
- = dados de entrada
- = cálculos intermediários
- = dados de saída

$$uc^2(b\emptyset) = 0,150776$$

Incerteza: $uc(b\emptyset) = 0,388299 \%$

Relação entre medidas de umidade relativa

Relação entre medidas de umidade relativa



Relação entre correções

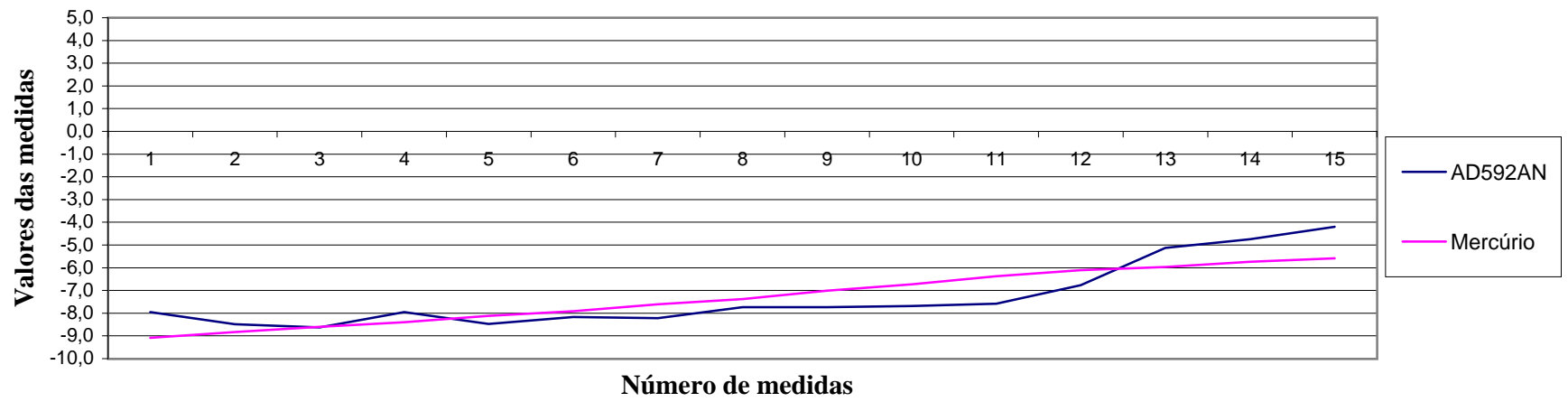


Tabela 2-Planilha para cálculo de curva de calibração
Segunda sequência de medidas usando psicrômetro AD592AN

[%]											n= 15		
n	AD	Hg	bk=Hg-AD	qk=AD-Øi	qk^2	bk*qk	b(AD)	bk-b(AD)	(bk-b(AD))^2	uc(bAD)	Øi= 29 %	Ø= 68 %	
1	37,7	30,0	-7,770	8,720	76,038	-67,754	-8,6395	0,8695	0,755980	0,35638	D= 21292,55		
2	40,0	32,1	-7,940	11,020	121,440	-87,499	-8,4362	0,4962	0,246186	0,32022	y1= -9,41024		
3	42,6	34,1	-8,480	13,610	185,232	-115,413	-8,2072	-0,2728	0,074399	0,28176	y2= 0,088391		
4	44,6	36,7	-7,940	15,610	243,672	-123,943	-8,0305	0,0905	0,008182	0,25436	Correção prevista		
5	47,1	39,6	-7,590	18,140	329,060	-137,683	-7,8068	0,2168	0,047013	0,22382	b(Ø)= -5,9630 oC		
6	50,4	42,3	-8,140	21,390	457,532	-174,115	-7,5196	-0,6204	0,384955	0,1946			
7	53,0	45,1	-7,860	23,960	574,082	-188,326	-7,2924	-0,5676	0,322185	0,18275			
8	55,2	47,4	-7,780	26,180	685,392	-203,680	-7,0962	-0,6838	0,467641	0,18229			
9	57,0	49,8	-7,200	28,000	784,000	-201,600	-6,9353	-0,2647	0,070074	0,18881	Cálculo de incerteza de medição		
10	59,5	52,4	-7,150	30,540	932,692	-218,361	-6,7108	-0,4392	0,192922	0,20705	s^2	u^2(y1)	u(y1)
11	61,7	54,2	-7,500	32,730	1071,253	-245,475	-6,5172	-0,9828	0,965908	0,22956	0,4932412	0,253169	0,50316
12	64,0	57,2	-6,760	35,000	1225,000	-236,600	-6,3165	-0,4435	0,196652	0,25768			
13	65,2	59,4	-5,840	36,240	1313,338	-211,642	-6,2069	0,3669	0,134645	0,27459	u^2(y2)	u(y2)	r(y1,y2)
14	66,5	61,7	-4,820	37,540	1409,252	-180,943	-6,0920	1,2720	1,618063	0,29322	0,0003475	0,018641	-0,9328
15	68,0	63,0	-5,000	39,000	1521,000	-195,000	-5,9630	0,9630	0,927330	0,31506			
TOTAL			-107,770	377,680	10928,982	-2588,033	-107,7700	0,0000	6,412136				

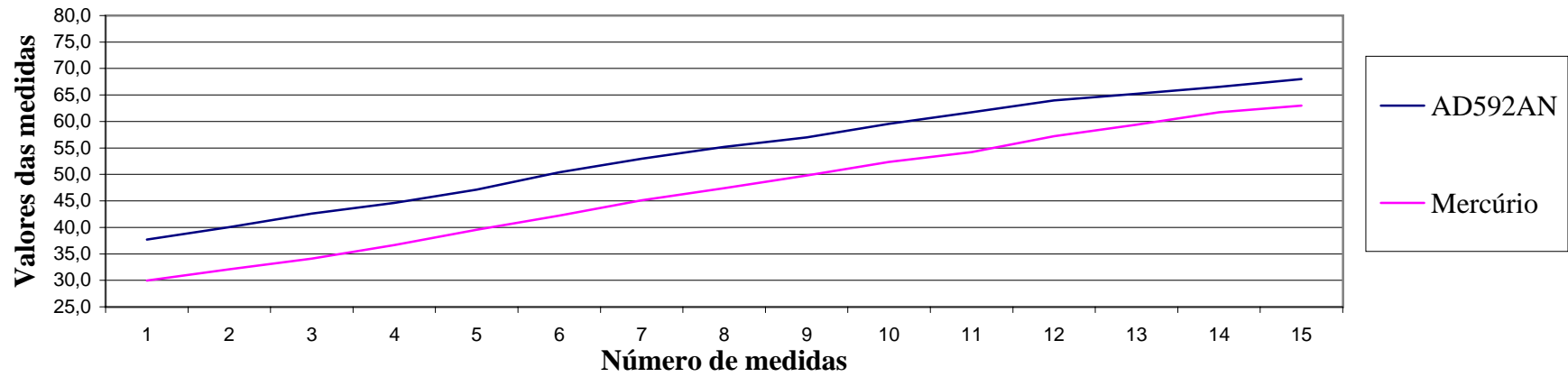
onde as cores têm o seguinte significado:

- = dados de entrada
- = cálculos intermediários
- = dados de saída

$uc^2(b\emptyset) = 0,099261$
Incerteza: $uc(b\emptyset) = 0,315056 \%$

Relação entre medidas de umidade relativa

Relação entre medidas de umidade relativa



Relação entre correções

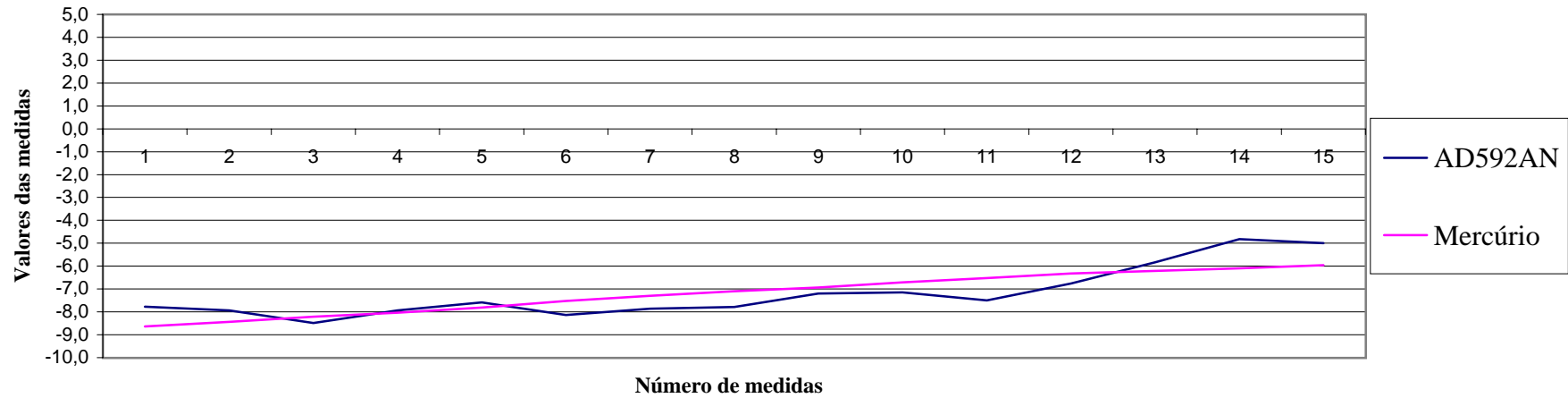


Tabela 3-Planilha para cálculo de curva de calibração
Terceira sequência de medidas usando psicrômetro AD592AN

[%]											n= 15	
n	AD	Hg	bk=Hg-AD	qk=AD-Øi	qk^2	bk*qk	b(AD)	bk-b(AD)	(bk-b(AD))^2	uc(bAD)	Øi= 29 %	
1	36,7	29,1	-7,570	7,660	58,676	-57,986	-8,0910	0,5210	0,271416	0,29707	Ø= 68 %	
2	38,5	30,6	-7,920	9,470	89,681	-75,002	-7,9834	0,0634	0,004021	0,27622	D= 30866,19	
3	40,5	32,8	-7,770	11,530	132,941	-89,588	-7,8610	0,0910	0,008278	0,25354	y1= -8,54621	
4	42,8	34,8	-7,970	13,760	189,338	-109,667	-7,7285	-0,2415	0,058345	0,23059	y2= 0,05943	
5	45,5	37,7	-7,710	16,450	270,603	-126,830	-7,5686	-0,1414	0,019998	0,20592	Correção prevista	
6	47,7	39,9	-7,820	18,700	349,690	-146,234	-7,4349	-0,3851	0,148326	0,18869	b(Ø)= -6,2284 %	
7	51,0	43,4	-7,570	21,970	482,681	-166,313	-7,2405	-0,3295	0,108549	0,1712		
8	54,1	48,6	-5,540	25,090	629,508	-138,999	-7,0551	1,5151	2,295561	0,16513		
9	56,9	49,3	-7,640	27,910	778,968	-213,232	-6,8875	-0,7525	0,566229	0,16957	Cálculo de incerteza de medição	
10	59,4	52,4	-6,990	30,380	922,944	-212,356	-6,7407	-0,2493	0,062137	0,18069	s^2	
11	62,1	55,2	-6,910	33,130	1097,597	-228,928	-6,5773	-0,3327	0,110694	0,19961	u^2(y1)	
12	65,7	58,3	-7,400	36,690	1346,156	-271,506	-6,3657	-1,0343	1,069730	0,23156	u(y1)	
13	67,6	61,7	-5,960	38,610	1490,732	-230,116	-6,2516	0,2916	0,085040	0,25128	u^2(y2)	
14	71,0	65,3	-5,670	41,980	1762,320	-238,027	-6,0513	0,3813	0,145419	0,28878	u(y2)	
15	73,3	68,0	-5,310	44,310	1963,376	-235,286	-5,9129	0,6029	0,363447	0,31629	r(y1,y2)	
TOTAL			-105,750	377,640	11565,211	-2540,070	-105,7500	0,0000	5,317189			

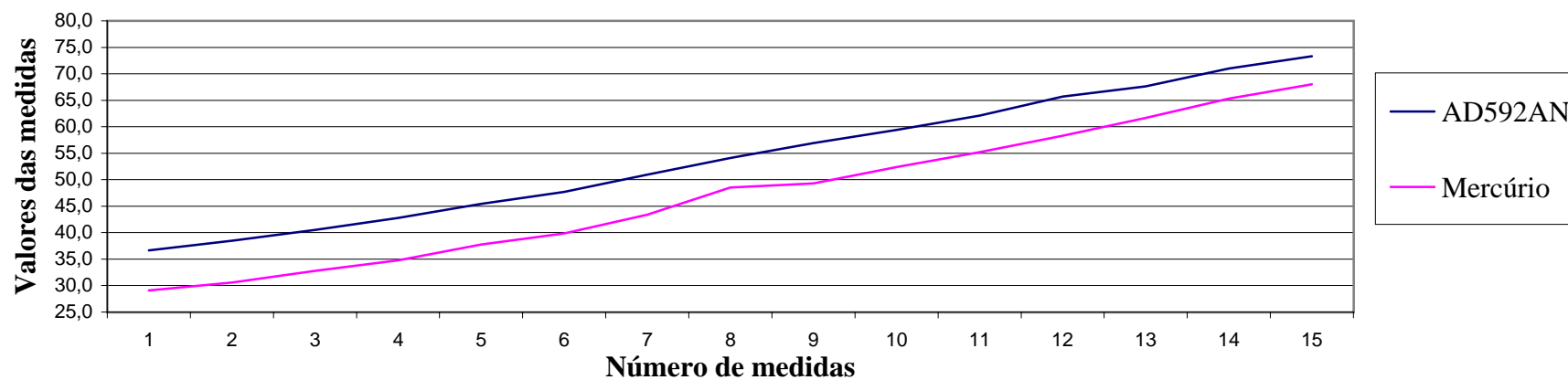
onde as cores têm o seguinte significado:

- = dados de entrada
- = cálculos intermediários
- = dados de saída

$uc^2(b\emptyset) = 0,065253$
Incerteza: $uc(b\emptyset) = 0,255446 \%$

Relação entre medidas de umidade relativa

Relação entre medidas de unidade relativa



Relação entre correções

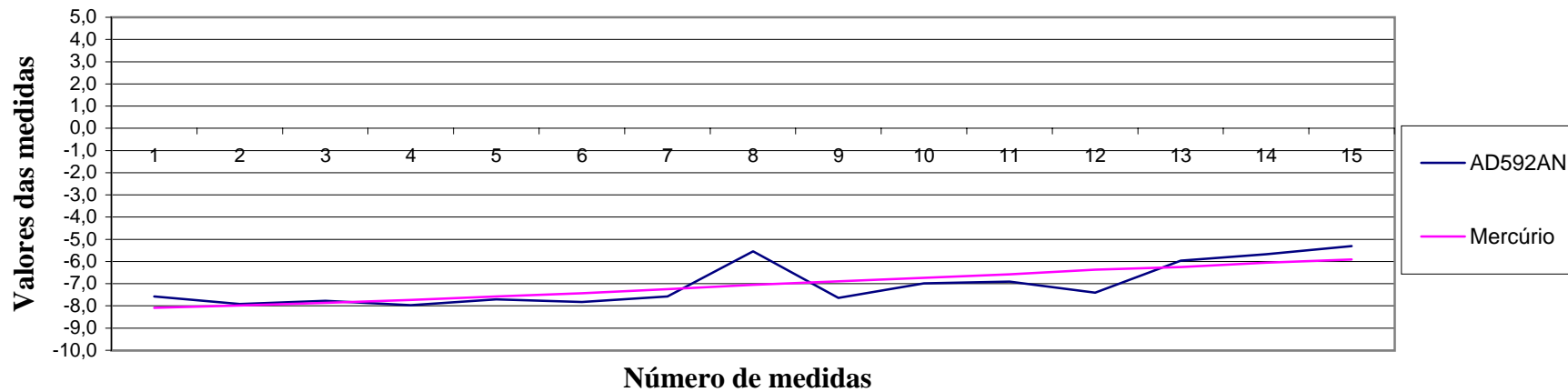


Tabela 4-Planilha para cálculo de curva de calibração
Primeira sequência de medidas usando psicrômetro Pt100

[%]											n=	15	
n	Pt	Hg	bk=Hg-Pt	qk=Pt-Øi	qk^2	bk*qk	b(Pt)	bk-b(Pt)	(bk-b(Pt))^2	uc(bPt)	Øi=	30 %	
1	34,6	30,7	-3,890	4,550	20,703	-17,700	-2,7163	-1,1737	1,377631	0,48308	Ø=	74 %	
2	33,9	30,8	-3,070	3,870	14,977	-11,881	-2,8248	-0,2452	0,060115	0,49629	D=	32095,37	
3	35,7	33,3	-2,370	5,670	32,149	-13,438	-2,5375	0,1675	0,028057	0,46174	y1=	-3,44254	
4	38,1	39,0	0,830	8,130	66,097	6,748	-2,1448	2,9748	8,849671	0,4171	y2=	0,159619	
5	41,8	39,7	-2,180	11,830	139,949	-25,789	-1,5543	-0,6257	0,391563	0,3578	Correção prevista		
6	44,6	43,1	-1,560	14,620	213,744	-22,807	-1,1089	-0,4511	0,203479	0,32207	b(Ø)=	3,5807 %	
7	48,7	48,6	-0,140	18,690	349,316	-2,617	-0,4593	0,3193	0,101930	0,29031			
8	51,1	50,2	-0,940	21,130	446,477	-19,862	-0,0698	-0,8702	0,757257	0,28586	Cálculo de incerteza de medição		
9	53,3	53,8	0,440	23,310	543,356	10,256	0,2782	0,1618	0,026188	0,29188			
10	57,2	57,0	-0,170	27,160	737,666	-4,617	0,8927	-1,0627	1,129345	0,32345	s^2	u^2(y1)	u(y1)
11	59,6	60,6	0,950	29,620	877,344	28,139	1,2854	-0,3354	0,112472	0,35485	1,2249875	0,330022	0,57448
12	61,9	63,4	1,540	31,890	1016,972	49,111	1,6477	-0,1077	0,011600	0,38952			
13	64,8	67,8	2,980	34,770	1208,953	103,615	2,1074	0,8726	0,761421	0,43926	u^2(y2)	u(y2)	r(y1,y2)
14	68,0	69,8	1,800	38,000	1444,000	68,400	2,6230	-0,8230	0,677286	0,50048	0,0005725	0,023927	-0,86749
15	69,2	73,2	4,010	39,180	1535,072	157,112	2,8113	1,1987	1,436823	0,52391			
TOTAL			-1,770	312,420	8646,775	304,669	-1,7700	0,0000	15,924838				

onde as cores têm o seguinte significado:

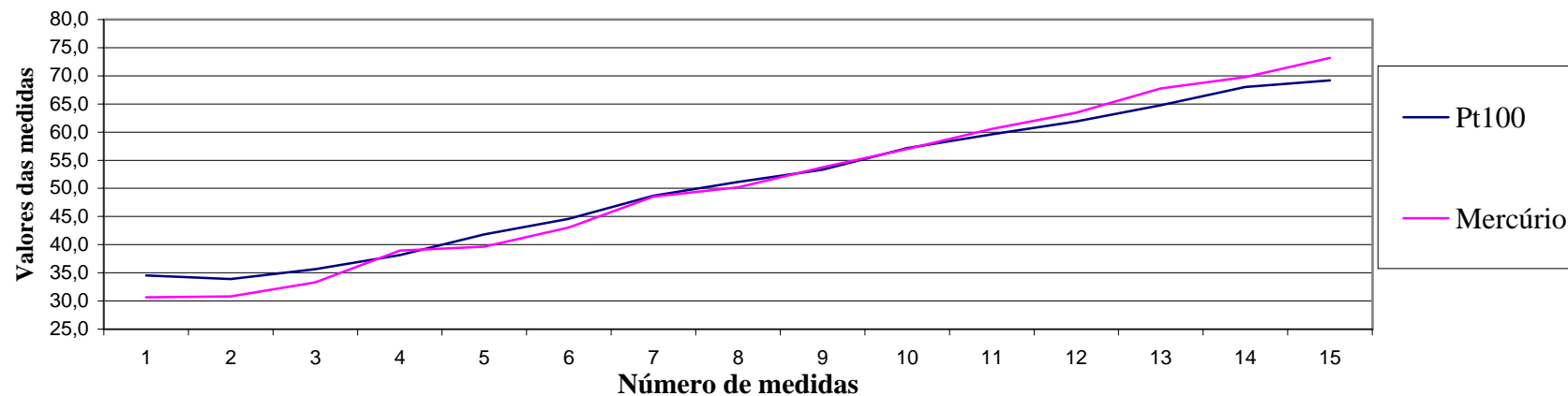
- = dados de entrada
- = cálculos intermediários
- = dados de saída

$$uc^2(b\emptyset) = 0,389068$$

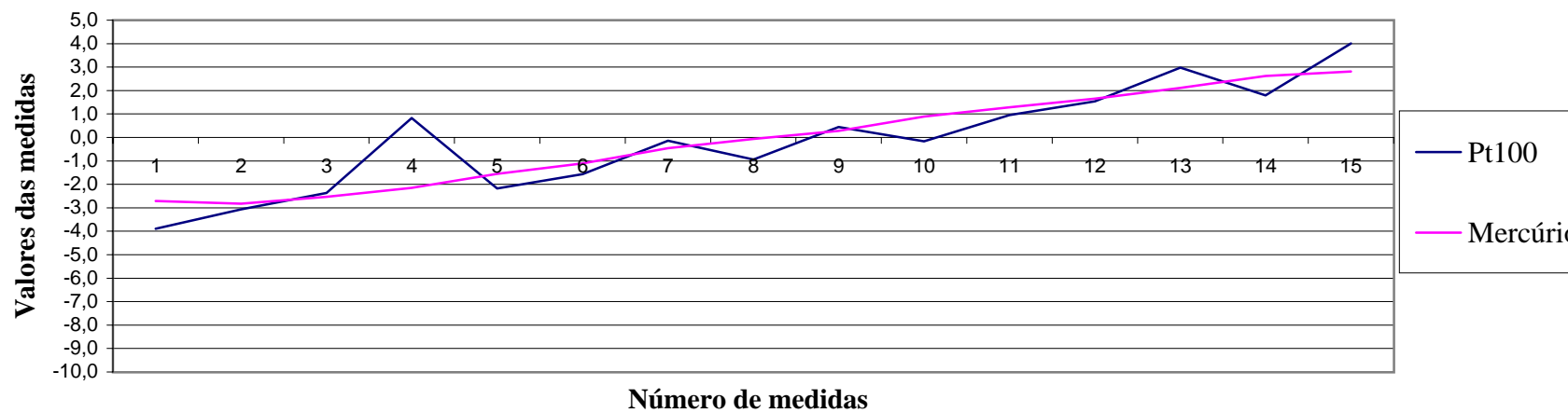
Incerteza: $uc(b\emptyset) = 0,623754 \%$

Relação entre medidas de umidade relativa

Relação entre medidas de umidade relativa



Relação entre correções



**Tabela 5-Planilha para cálculo de curva de calibração
Segunda sequência de medidas usando psicrômetro Pt100**

[%]											n= 15	
n	Pt	Hg	bk=Hg-Pt	qk=Pt-Øi	qk^2	bk*qk	b(Pt)	bk-b(Pt)	(bk-b(Pt))^2	uc(bPt)	Øi= 34 %	
1	39,3	34,5	-4,740	5,270	27,773	-24,980	-4,6299	-0,1101	0,012117	0,38838	Ø= 67 %	
2	40,0	36,6	-3,440	6,020	36,240	-20,709	-4,4467	1,0067	1,013415	0,37229	D= 14902,79	
3	42,7	38,5	-4,200	8,700	75,690	-36,540	-3,7919	-0,4081	0,166531	0,31768	y1= -5,91747	
4	44,5	41,2	-3,280	10,520	110,670	-34,506	-3,3473	0,0673	0,004524	0,28415	y2= 0,244316	
5	46,3	43,6	-2,660	12,290	151,044	-32,691	-2,9148	0,2548	0,064934	0,25556	Correção prevista	
6	47,7	45,1	-2,610	13,700	187,690	-35,757	-2,5703	-0,0397	0,001573	0,23659	b(Ø)= 2,1450 %	
7	49,6	47,7	-1,870	15,610	243,672	-29,191	-2,1037	0,2337	0,054612	0,21798		
8	52,2	50,2	-2,000	18,190	330,876	-36,380	-1,4734	-0,5266	0,277353	0,20913		
9	54,0	52,7	-1,210	19,950	398,003	-24,140	-1,0434	-0,1666	0,027769	0,21494	Cálculo de incerteza de medição	
10	57,0	55,1	-1,870	22,990	528,540	-42,991	-0,3006	-1,5694	2,462896	0,24512	s^2	
11	57,8	57,6	-0,260	23,840	568,346	-6,198	-0,0930	-0,1670	0,027899	0,25719	0,6557287	
12	60,6	60,2	-0,380	26,620	708,624	-10,116	0,5862	-0,9662	0,933600	0,30437	u^2(y1)	
13	62,3	63,1	0,820	28,300	800,890	23,206	0,9967	-0,1767	0,031216	0,33705	u(y1)	
14	62,8	64,9	2,130	28,800	829,440	61,344	1,1188	1,0112	1,022446	0,34721	0,6557287	
15	63,4	66,2	2,810	29,350	861,423	82,473	1,2532	1,5568	2,423585	0,35859	0,257795	
TOTAL			-22,760	270,150	5858,921	-167,175	-22,7600	0,0000	8,524473		0,50773	
											u^2(y2)	
											0,0006600	
											u(y2)	
											0,025691	
											r(y1,y2)	
											-0,91128	

onde as cores têm o seguinte significado:

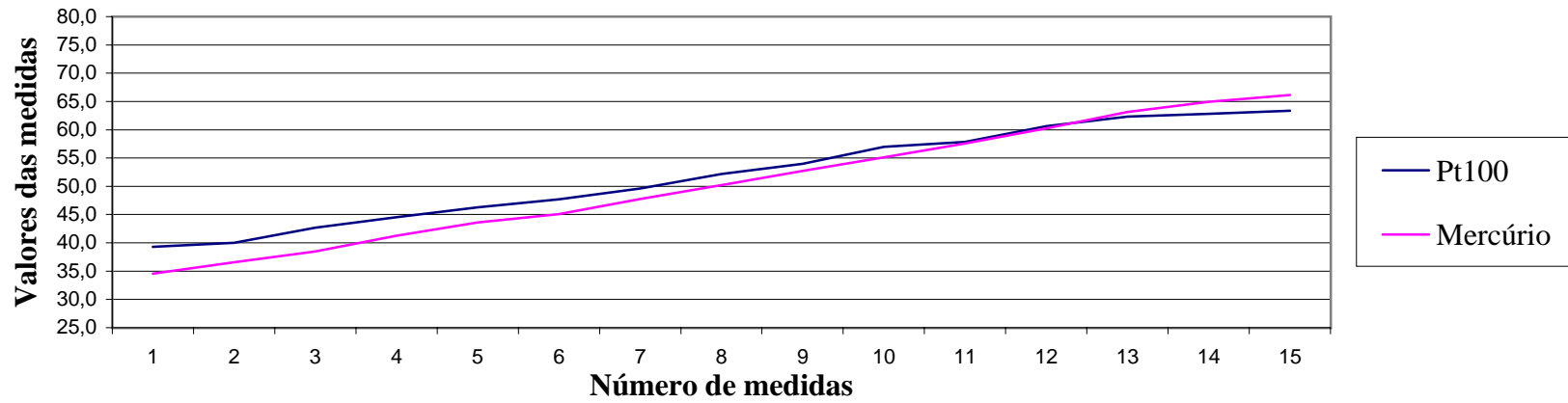
- = dados de entrada
- = cálculos intermediários
- = dados de saída

$$uc^2(b\emptyset) = 0,192019$$

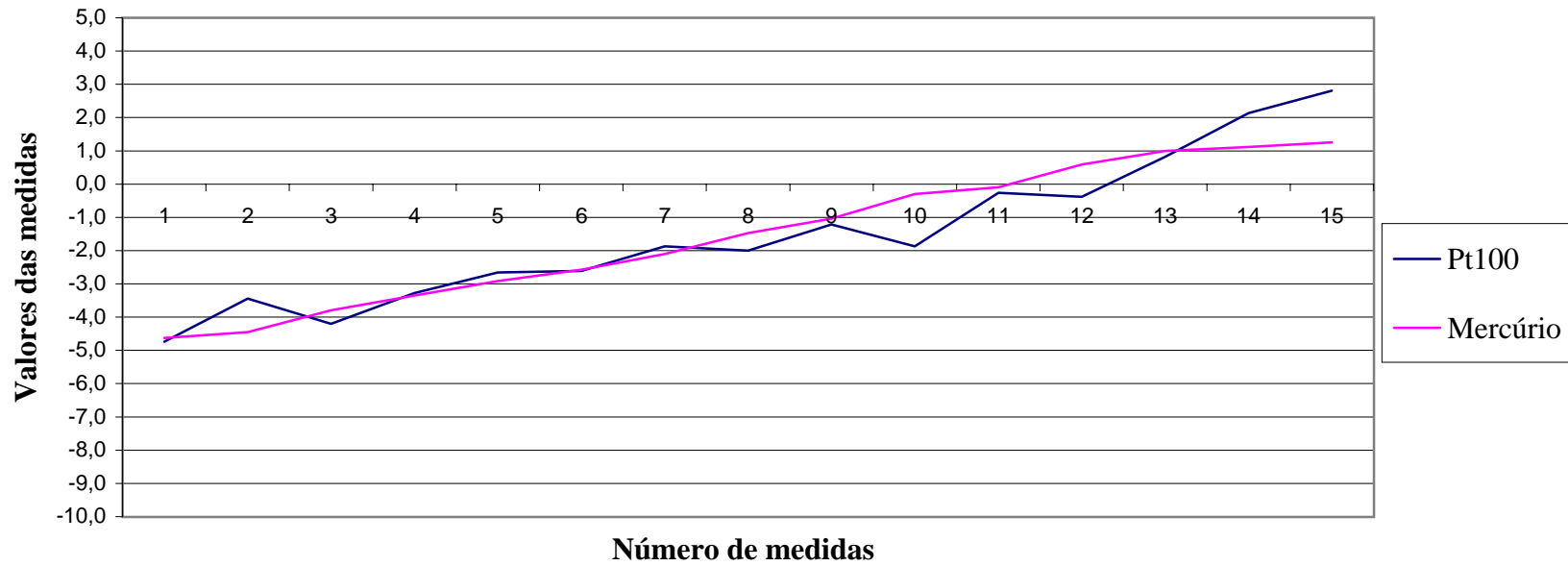
$$\text{Incerteza: } uc(b\emptyset) = 0,438199 \%$$

Relação entre medidas de umidade relativa

Relação entre medidas de umidade relativa



Relação entre correções



Número de medidas

Tabela 6-Planilha para cálculo de curva de calibração
Terceira sequência de medidas usando psicrômetro Pt100

[%]											n=	15	
n	Pt	Hg	bk=Hg-Pt	qk=Pt-Øi	qk^2	bk*qk	b(Pt)	bk-b(Pt)	bk-b(Pt)^2	uc(bPt)	Øi=	25 %	
1	32,7	26,3	-6,390	7,700	59,290	-49,203	-7,1851	0,7951	0,632214	0,38818	Ø=	58 %	
2	34,4	27,6	-6,780	9,420	88,736	-63,868	-6,7262	-0,0538	0,002900	0,34725	D=	12113,84	
3	34,9	28,7	-6,150	9,880	97,614	-60,762	-6,6034	0,4534	0,205575	0,33675	y1=	-9,2398	
4	37,0	30,8	-6,210	12,030	144,721	-74,706	-6,0297	-0,1803	0,032510	0,29104	y2=	0,266842	
5	38,4	32,4	-5,940	13,370	178,757	-79,418	-5,6721	-0,2679	0,071757	0,26622	Correção prevista		
6	39,7	34,2	-5,510	14,700	216,090	-80,997	-5,3172	-0,1928	0,037162	0,24541	b(Ø)=	-0,4340 %	
7	41,7	36,6	-5,160	16,720	279,558	-86,275	-4,7782	-0,3818	0,145767	0,22342			
8	43,0	38,5	-4,570	18,020	324,720	-82,351	-4,4313	-0,1387	0,019235	0,21686			
9	44,8	40,4	-4,430	19,810	392,436	-87,758	-3,9537	-0,4763	0,226896	0,21873	Cálculo de incerteza de medição		
10	46,5	42,3	-4,280	21,540	463,972	-92,191	-3,4920	-0,7880	0,620901	0,23219	s^2	u^2(y1)	u(y1)
11	48,3	44,8	-3,490	23,270	541,493	-81,212	-3,0304	-0,4596	0,211241	0,25529	0,7002324	0,348332	0,5902
12	50,2	47,7	-2,530	25,190	634,536	-63,731	-2,5181	-0,0119	0,000143	0,28939			
13	52,6	50,6	-2,080	27,630	763,417	-57,470	-1,8670	-0,2130	0,045386	0,34143	u^2(y2)	u(y2)	r(y1,y2)
14	53,0	53,7	0,760	27,950	781,203	21,242	-1,7816	2,5416	6,459583	0,34877	0,0008671	0,029446	-0,93058
15	57,6	56,4	-1,180	32,550	1059,503	-38,409	-0,5541	-0,6259	0,391753	0,46277			
TOTAL			-63,940	279,780	6026,046	-977,110	-63,9400	0,0000	9,103022				

onde as cores têm o seguinte significado:

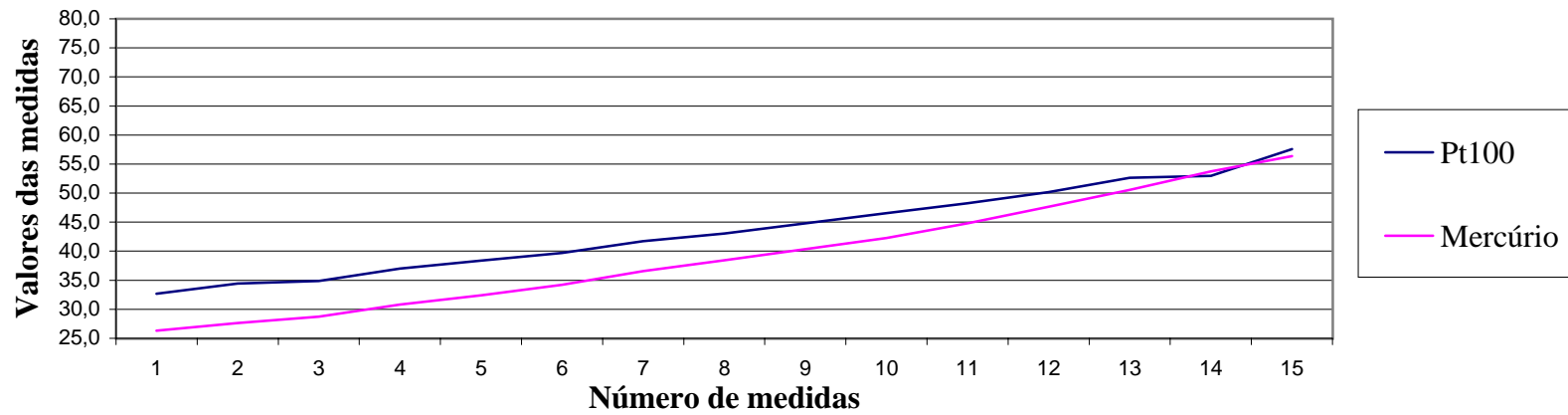
- = dados de entrada
- = cálculos intermediários
- = dados de saída

$$uc^2(b\emptyset) = 0,225181$$

$$\text{Incerteza: } uc(b\emptyset) = 0,474532 \%$$

Relação entre medidas de umidade relativa

Relação entre medidas de umidade relativa



Relação entre correções

